A PRODUÇÃO E INOVAÇÃO DE CONHECIMENTO CIENTÍFICO COMO FORMA DE EMPODERAMENTO NA SOCIEDADE NAS INTERFACES DO IV SIMPEP

ORGANIZADORES

Antonio Gilson Barbosa de Lima
Maria Fátima David Dantas
Romário da Silva Santos
Josedite Saraiva de Souza
Stephane Katherine Barbosa Moura da Silva
Laíza Soliely Costa Gonçalves
Glauco Ruben de Freitas Brito

Editora Poisson

Antonio Gilson Barbosa de Lima
Maria Fátima David Dantas
Romário da Silva Santos
Josedite Saraiva de Souza
Stephane Katherine Barbosa Moura da Silva
Laíza Soliely Costa Gonçalves
Glauco Ruben de Freitas Brito
Organizadores

A produção e inovação de conhecimento científico como forma de empoderamento na sociedade nas interfaces do IV SIMPEP

1ª Edição

Belo Horizonte
Editora Poisson
2025

Editor Chefe: Dr. Darly Fernando Andrade

Conselho Editorial

Dr. Antônio Artur de Souza – Universidade Federal de Minas Gerais
Ms. Davilson Eduardo Andrade
Dra. Elizângela de Jesus Oliveira – Universidade Federal do Amazonas
MSc. Fabiane dos Santos
Dr. José Eduardo Ferreira Lopes – Universidade Federal de Uberlândia
Dr. Otaviano Francisco Neves – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais
Dr. Luiz Cláudio de Lima – Universidade FUMEC
Dr. Nelson Ferreira Filho – Faculdades Kennedy
Ms. Valdiney Alves de Oliveira – Universidade Federal de Uberlândia

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

P964

A produção e inovação de conhecimento científico como forma de empoderamento na sociedade nas interfaces do IV SIMPEP/ Organizadores: LIMA, Antonio Gilson Barbosa de et al./ Editora Poisson – Belo Horizonte MG: Poisson, 2025

Formato: PDF
ISBN: 978-65-5866-550-2
DOI: 10.36229/978-65-5866-550-2

Modo de acesso: World Wide Web
Inclui bibliografia

1. Engenharia de Materiais 2. Biotecnologia 3. Energia I. LIMA, Antonio Gilson et al. II. Título

CDD-620.11

Sônia Márcia Soares de Moura – CRB 6/1896

O conteúdo deste livro está licenciado sob a Licença de Atribuição Creative Commons 4.0.
Com ela é permitido compartilhar o livro, devendo ser dado o devido crédito, não podendo ser utilizado para fins comerciais e nem ser alterada.

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos seus respectivos autores.

Esse e outros títulos podem ser baixados gratuitamente em www.poisson.com.br
Entre em contato pelo contato@poisson.com.br

Organizadores

Antonio Gilson Barbosa de Lima

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos - PPGEP

Graduado em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal da Paraíba (1991), Graduado Licenciatura Plena em Física pela Universidade Estadual da Paraíba (1990), Mestre em Engenharia Mecânica [C. Grande] pela Universidade Federal da Paraíba (1995) e Doutor em Engenharia Mecânica pela Universidade Estadual de Campinas (1999). Atualmente é Professor Titular do Departamento de Engenharia Mecânica, do Centro de Ciências e Tecnologia, da Universidade Federal de Campina Grande. Tem experiência na área de Engenharia Mecânica, com ênfase em Transferência de calor e massa, Escoamento fluido, Matemática aplicada, Princípios Variacionais e Métodos Numéricos, atuando principalmente nos seguintes temas: volumes finitos, secagem e desenvolvimento de secadores, escoamento multifásico e meios porosos. Tem publicado um número expressivo de artigos em periódicos de relevância, livros e capítulos de livros em editoras de reconhecida competência internacional e formado recursos humanos de alto nível (Graduação, mestrado e doutorado).

Maria Fátima David Dantas

Secretária do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos- PPGEP

Possui graduação em Gestão de Recursos Humanos pela Universidade Paulista (2015). Mestre em Gestão e Sistemas Agroindustriais (PPGGSA) pela Universidade Federal de Campina Grande (2018). Atualmente é assistente em administração da Universidade Federal de Campina Grande. Tem experiência na área de Administração, com ênfase em Administração em Recursos Humanos, atuando principalmente nos seguintes temas: qualidade de vida, saneamento básico, direito fundamental, saúde e saúde ambiental.

Romário da Silva Santos

Presidente do SIMPEP

Graduado em Licenciatura Plena em Física pela Universidade Estadual da Paraíba - UEPB (2017) e em Licenciatura em Matemática pela Universidade Cruzeiro do Sul (2023), Especialista em Ensino de Matemática pelo Instituto Federal da Paraíba - IFPB (2021), Mestre em Física pela Universidade Federal de Campina Grande - UFCG (2019) e Doutorando em Engenharia de Processos na Universidade Federal de Campina Grande - UFCG (2021 - atual). Possui experiência na Área da Física, com ênfase em Cosmologia Teórica e Observacional, em Modelagem Matemática e Ensino, além de abordagens práticas de aprendizagem em Física e Matemática. Também tem experiência em processos e metodologias de pesquisa científica e ainda em aulas de Física, Matemática e Ciências Naturais nos diferentes níveis.

Organizadores

Josedite Saraiva de Souza

Vice-Presidente do SIMPEP

Possui Doutorado em Engenharia de Processos pela Universidade Federal de Campina Grande (2014), Mestrado (2009) e Graduação (2006) ambos em Engenharia Química pela Universidade Federal de Campina Grande UFCG, Cursando Licenciatura em Química na Faculdade Cruzeiro do Sul Educacional. Foi integrante do projeto de pesquisa Edital MCT/CNPq/CT-Hidro No 22/2009 no Desenvolvimento de produtos e processos poupadores de água com ênfase em Operações de Separação e Mistura. Atuou como Professora e Coordenadora Adjunta no Núcleo de Pesquisa de Engenharias Gerais - NPEG FMN-CG nas áreas de Mecânica dos Fluidos, Hidráulica e Transferência de Calor (Térmica e Fluidos) com ênfase às aplicações industriais com vistas ao desenvolvimento e otimização de produtos e processos, com economia de energia e redução de emissão de poluentes, visando a Sustentabilidade e Alternativas Energéticas. Também fez parte da Assessoria de Inovação e da Assessoria Técnica Científica da CEAD/UFCG (Coordenação de Educação a Distância), e na comissão do Programa de Pós-Graduação da Unidade Acadêmica de Engenharia Biotecnologia e Bioprocesso CDSA/UFCG.

Stephane Katherine Barbosa Moura da Silva

Produtor de Marketing do SIMPEP

Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais e Bacharela em Engenharia de Materiais, ambos pela Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). Atuou como aluna de Iniciação Tecnológica e Industrial no projeto: Smart Composites - Desenvolvimento de Compósitos Inteligentes Incorporando Ligas com Memória de Forma para Aplicações Aeroespaciais, onde desenvolveu atividades na área de simulação computacional no Laboratório Computacional de Térmica e Fluídos e no Laboratório Computacional de Alto Desempenho, ambos vinculados ao departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). Teve como tema do Trabalho de Conclusão de Curso a utilização da modelagem matemática no processo de secagem para tijolos industriais. Também atuou como estagiária na empresa Vale das Águas Indústria e Comércio de Águas Adicionadas de Sais Ltda, no setor de dessalinização, cuja sua principal atividade foi o monitoramento das membranas cerâmicas utilizadas na técnica de Osmose Reversa, no processo de dessalinização. No mestrado, teve sua dissertação na área de Estruturas, Processamentos e Propriedades de Materiais, cujo tema foi a Transferência de Calor e Massa em Blocos Cerâmicos Estruturais: Modelagem, Simulação e Análise Numérica. Atualmente segue como aluna regular de Doutorado no Programa de Pós-graduação em Engenharia de Processos da Universidade Federal de Campina Grande e como graduanda em Licenciatura em Química pela Universidade Cruzeiro do Sul.

Organizadores

Laíza Soliely Costa Gonçalves

Produtor de Marketing do SIMPEP

Mestrado em Processo e Tecnologia de Produtos Agroalimentares pelo Programa de Pós-graduação em Tecnologia Agroalimentar - PPGTA/UFPB (2023). Graduação no curso de Bacharelado em Agroindústria pela Universidade Federal da Paraíba (2020). Técnico em Agroindústria pelo Colégio Agrícola Vidal de Negreiros - CAVN/CCHSA (2021). Pesquisadora do Grupo de Estudos em Laticínios (GEL) e no Grupo de Pesquisa em Ciência e Tecnologia de Leite Asinino e Caprino (GPLAC) da Universidade Federal da Paraíba.

Glauco Ruben de Freitas Brito

Produtor de Marketing do SIMPEP

Graduado em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal de Campina Grande (2017).Mestre em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal de Campina Grande(2021). Membro integrante da equipe ParahyAsas-Aerodesign, durante o ano de (2009).Estagiário em Engenharia Mecânica (2017), responsável pela implantação de ferramentas de gestão industrial e Engenharia de Processos, na indústria de materiais poliméricos, bem como, elaboração de planos de manutenção preditiva em compressores industriais e máquinas de sopro de materiais poliméricos. Membro consultor independente na empresa Supremma Engenharia (2018), atuando no setor de manutenção preditiva por análise de vibrações em motores Diesel da indústria calçadista. Possui mestrado em Engenharia Mecânica (PPGEM/CCT-UFCG). Obteve o título de mestre em Engenharia Mecânica, ao defender a dissertação intitulada: Estudo da Cinética da Transformação Martensita-Austenita em Ligas Ni-Ti-Hf com Efeito de Memória de Forma (2021). Atuou profissionalmente na Indústria automotiva no setor de modelagem computacional, utilizando Método dos Elementos Finitos, Softwares CAE (Computer Aided Engineering), visando aplicações em vibrações mecânicas e atenuação e controle do ruído (Acústica automotiva).

Prefacio

O IV Simpósio da Pós-Graduação em Engenharia de Processos (SIMPEP), intitulado "A produção e inovação de conhecimento científico como forma de empoderamento na sociedade" teve como objetivo evidenciar as faces da engenharia e multidisciplinaridade do curso de pós-graduação, enfatizando a necessidade e a sensatez da ciência para com os dilemas do mundo contemporâneo. Além da busca incessante de incentivar e valorizar as pesquisas e publicações científicas.

A intensificação, a modernização e a importância da inovação na atividade industrial em todas as áreas da engenharia, da arquitetura, da física, da meteorologia e das ciências aplicadas vêm exigindo um aumento das pesquisas científicas e tecnológicas no país. De posse de estudos com um alto nível de qualidade, é possível otimizar a produção de vários produtos e processos diversos, tais como a geometria de automóveis, aviões, navios e ciclones, ou prever a dispersão de derramamento de óleos em cursos d'água, por exemplo. Também é possível estudar o escoamento de sangue nas artérias, a injeção e cura de materiais compósitos, o escoamento de petróleo em reservatórios, trocas térmicas, a secagem de grãos, o conforto ambiental, as correntes de ar na atmosfera, dentre várias outras possibilidades. Sendo assim, é de extrema importância a disseminação de produção científica e o intercâmbio entre pesquisadores, incentivando a troca de conhecimentos. O IV SIMPEP foi um momento oportuno para uma discussão mais abrangente das questões destacadas acima, que resultou em pesquisas que se destacam por sua qualidade e impacto para a ciência.

O livro, A produção e inovação de conhecimento científico como forma de empoderamento na sociedade, é pautado conforme as linhas de pesquisa abordadas no evento, as quais estão elencadas no sumário e estabelecem a divisão de capítulos. É necessário enfatizar, que o livro traz em sua estrutura a multidisciplinaridade que é vivenciada no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos da Universidade Federal de Campina Grande - UFCG. Portanto, o leitor terá acesso a um acervo de conhecimentos múltiplos, elencados e estruturados por pesquisadores de diversas áreas do conhecimento, com o olhar direcionado às interfaces da engenharia de processos e a ciência em sua totalidade como força para os desafios da sociedade.

Esperamos que o leitor possa compreender as múltiplas faces da engenharia e sua associação com as áreas do conhecimento abordadas na referida obra, assim com, observar a ciência como algo plural, que não se detém a recortes e algo finalizado, pois ela ocupa e deve ter espaço em todos os lugares e âmbitos do nosso cotidiano. Esperamos que esse seja mais um passo para o rompimento de barreiras e de empoderamento na sociedade através da ciência.

Cordialmente,

Os Organizadores

SUMÁRIO

UNIDADE I - PROCESSOS TÉRMICOS E DE SEPARAÇÃO

Capítulo 1: Estudo dos aspectos físicos e matemáticos da secagem de materiais cerâmicos utilizando o Método de Monte Carlo – uma proposta de estudo 11

Romário da Silva Santos, Antonio Gilson Barbosa de Lima

DOI: 10.36229/978-65-5866-550-2.CAP.01

Capítulo 2: Secagem de tijolos argilosos industriais: análise termofluidodinâmica via CFD 29

Adriano de Sousa Cabral, Morgana de Vasconcellos de Araújo, Antonio Gilson Barbosa de Lima

DOI: 10.36229/978-65-5866-550-2.CAP.02

Capítulo 3: Aspectos da biotecnologia microbiana na produção de energia térmica 38

Sandra Maijane Soares de Belchior, Mario Eduardo Rangel Moreira Cavalcanti Mata

DOI: 10.36229/978-65-5866-550-2.CAP.03

Capítulo 4: Análise termográfica na usinagem do aço inox 316 56

Karoline Stefany Ferreira da Luz, Marcelio Ronnie Dantas de Sá

DOI: 10.36229/978-65-5866-550-2.CAP.04

Capítulo 5: Infiltração de umidade em elementos porosos: fundamentos, modelagem matemática e aplicações em edificações 64

Bruna Thalita Alexandre Silva, Antonio Gilson Barbosa de Lima

DOI: 10.36229/978-65-5866-550-2.CAP.05

UNIDADE II - DESENVOLVIMENTO E TECNOLOGIA DE MATERIAIS

Capítulo 6: Análise de atenuação de vibrações utilizando absorvedor dinâmico tipo pêndulo com fio LMF Ni-Ti superelástico 91

Karoline Stefany Ferreira da Luz, Marcelio Ronnie Dantas de Sá

DOI: 10.36229/978-65-5866-550-2.CAP.06

Capítulo 7: Calibração dos parâmetros de modelo de dano micromecânico para aço de vaso de pressão por elementos finitos e planejamento experimental 113

Gabriel de Castro Coêlho, Marco Antonio dos Santos

DOI: 10.36229/978-65-5866-550-2.CAP.07

SUMÁRIO

Capítulo 8: Compósitos poliméricos reforçados com fibras: uma curta revisão..... 129

Sebastião da Silva Pinto, Antonio Gilson Barbosa de Lima, Laura Hecker de Carvalho

DOI: 10.36229/978-65-5866-550-2.CAP.08

Capítulo 9: Ligas com memória de forma para aplicações em *morphing aircraft* – uma revisão de literatura..... 141

Felipe Silva Lima, Railson de Medeiros Nobrega Alves, Alan de Oliveira Monteiro

DOI: 10.36229/978-65-5866-550-2.CAP.09

Capítulo 10: Influência do tratamento térmico e severidade de resfriamento sobre a microestrutura e dureza em pré-formas de AISI 316L-Si obtidas por mada..... 156

Júlio Feitosa da Silva Neto, Glauco Ruben de Freitas de Brito, Yuri Emanoel Pereira Dias, Carlos José de Araújo, Gabriel de Castro Coêlho

DOI: 10.36229/978-65-5866-550-2.CAP.10

Capítulo 11: Processo de separação sólido-fluido via CFD: efeito da velocidade de injeção de partículas no hidrociclone..... 169

Josedite Saraiva de Souza, Severino Rodrigues de Farias Neto, Antonio Gilson Barbosa de Lima, Fabiana Pimentel Macêdo Farias

DOI: 10.36229/978-65-5866-550-2.CAP.11

Capítulo 12: Estudo da cinética da transformação martensita-austenita em ligas com memória de forma de altas temperaturas Ni-Ti-Hf obtidas por melt-spinning..... 182

Glauco Ruben de Freitas Brito, Roniere Leite Soares, Júlio Feitosa da Silva Neto, Carlos José de Araújo, Antônio Gilson Barbosa de Lima

DOI: 10.36229/978-65-5866-550-2.CAP.12

Capítulo 13: Estrutura/propriedades da liga superelástica Ti-27Nb(%at) produzida por fusão a arco e laminada a frio..... 195

Vitória Hellem Marques Costa Guedes, Suelene Silva Araújo

DOI: 10.36229/978-65-5866-550-2.CAP.13

UNIDADE III – BIOPRODUTOS

Capítulo 14: Elaboração e caracterização de leite fermentado kefir cremoso com adição de frutas vermelhas..... 205

Emily Bezerra Coutinho Cruz, Juliana Tatiaia de Morais Dias, Maria Tereza Sarmento da Fonsêca, Sabrina dos Santos Costa, Manoel Pessoa Ferreira Neto

DOI: 10.36229/978-65-5866-550-2.CAP.14

SUMÁRIO

Capítulo 15: Uso da casca da jabuticaba como fonte de extração de antocianinas: aproveitamento de resíduos 214

Mateus Pereira de Macêdo, Isabelly Marcela Araújo Pequeno, Charlene Maria de Alcântara, Francislaine Suelia dos Santos, Josivanda Palmeira Gomes

DOI: 10.36229/978-65-5866-550-2.CAP.15

Capítulo 16: Produção de amilases por *Aspergillus sp. FSDE16* e hidrólise enzimática da casca de mandioca..... 221

Tatiany Gonçalves Lisboa, Mikael Angelo Martins Souza, Laís Campos Teixeira de Carvalho Gonçalves

DOI: 10.36229/978-65-5866-550-2.CAP.16

Capítulo 17: Hidrogênio verde: revolucionando o futuro da energia limpa..... 228

Lucas Manuel Gomes dos Santos, Débora Rafaelly Soares, Fabiana Pimentel Macêdo Farias

DOI: 10.36229/978-65-5866-550-2.CAP.17

Autores: 244

Capítulo 1

Estudo dos aspectos físicos e matemáticos da secagem de materiais cerâmicos utilizando o Método de Monte Carlo – uma proposta de estudo

Romário da Silva Santos[1]
Antonio Gilson Barbosa de Lima[2]

Resumo: A secagem é uma das etapas do processo de fabricação dos materiais cerâmicos. É um processo termodinâmico que envolve fenômenos complexos de transferência de calor e massa, assim como variações dimensionais e volumétricas que, quando realizados de forma incorreta, acarretam danos estruturais ao produto, comprometendo seu desempenho e qualidade final. Todavia, apesar da relevância, pouco é conhecido o uso do Método de Monte Carlo para estudos acerca da secagem de materiais cerâmicos. Neste cenário, o presente trabalho tem como objetivo estudar a transferência de calor e massa durante a secagem de cerâmicos utilizando o Método de Monte Carlo, que se baseia em um modelo matemático para prever o comportamento dos fenômenos físicos a partir das soluções do problema em estudo, como proposta de análise da secagem de objetos cerâmicos de forma aleatória. Sendo assim, serão apresentados modelos matemáticos e soluções analíticas para descrever as cinéticas de perda de massa e aquecimento do material, incluindo variações dimensionais do sólido em estudo, utilizando a abordagem citada. Os resultados preditos para as variações da área superficial e volume e os comportamentos térmico e gravimétrico de alguns cerâmicos, como blocos estruturais, durante o processo de secagem que serão expostos forma comparados e analisados com dados experimentais, o que mostrou uma possibilidade de ótimos resultados.

Palavras–chave: Materiais cerâmicos, Secagem, Modelagem matemática, Método de Monte Carlo, Calor, Massa.

[1] Pós Graduando em Engenharia de Processos – PPGEP – UFCG
[2] Pesquisador do Departamento de Engenharia Mecânica – UAEM – UFCG

1. INTRODUÇÃO

As propriedades de um material dependem de sua estrutura, da sua composição química e de sua fabricação. Visto isso, compreender os processos acoplados de transferência simultânea de calor, transferência de massa e reações químicas, por exemplo, permite um pesquisador avaliar e desenvolver as diferentes etapas da produção de um determinado material para se obter uma alta qualidade no final do processo, conectando diferentes campos da engenharia na cadeia produtiva, desde as matérias-primas até a peça desejada.

No Brasil, dentre os vários produtos e materiais de abrangência, pode se destacar os cerâmicos, materiais inorgânicos e não metálicos produzidos, geralmente, por processos chamados de sinterização, que são tratamentos térmicos onde ocorre elevação de temperaturas das matérias-primas na forma de pó (CALLISTER JUNIOR e RETHWISCH, 2002; VAN VLACK, 1970). Eles podem ser divididos em grupos de diferentes aspectos, desde que se leve em consideração a sua composição química, microestrutura e as diversas aplicações dos mesmos (MUNZ e FETT, 1999). Segundo Cavalcanti (2010), a cerâmica está intimamente ligada à história da humanidade, sendo utilizada desde os primórdios das civilizações e, assim, considerada o material artificial mais antigo existente.

Analisando seus possíveis empregos, os cerâmicos podem ser classificados como materiais tradicionais ou avançados. Fabricados a partir de matérias-primas naturais, os materiais cerâmicos chamados “tradicionais” são obtidos de produtos conhecidos, como as argilas, por exemplo. Neste grupo se incluem as louças domésticas, louças sanitárias, revestimentos, tijolos e cimento (CALLISTER JUNIOR e RETHWISCH, 2002; VAN VLACK, 1970). O ramo da cerâmica vermelha, principal representante deste seguimento, é considerado em nosso país como artesanal. Já os cerâmicos ditos “avançados” são produzidos de forma sintética, com alta pureza e por um rígido controle de processamento.

No atual cenário de produção das indústrias cerâmicas, estima-se que cerca de um terço destes produtos são descartados diariamente por causa de problemas em alguma das etapas do processo de fabricação (PRADO e BRESSIANI, 2013). De acordo com Saleiro e Holanda (2012), a fabricação da cerâmica estrutural é dividida nas etapas de exploração das jazidas, prévio tratamento das matérias-primas, conformação, secagem e queima. Nota-se que a secagem, dentre todas essas etapas, é a maior responsável pelos descartes, uma vez que quando executada de maneira incorreta, acarreta danos irreparáveis para a peça final. Por isso, é de grande importância um amplo entendimento, teórico e experimental, deste processo.

A secagem pode ser definida como um fenômeno em que ocorre uma troca de energia termodinâmica através de condução, convecção e/ou radiação. Neste processo também há uma mudança no estado físico da água, passando da fase líquida para o estado de vapor, que em seguida vai ser evaporado para o ambiente. O objetivo desta etapa é reduzir o teor de umidade dos produtos a serem secos. No Brasil, são comercializados diferentes tipos de tijolos com diferentes geometrias, algo que é de difícil classificação, porém, pode-se para se organizar os estudos, é possível considerá-los em dois grupos distintos: os tijolos maciços e os blocos cerâmicos, também chamados de tijolos furados. É o processo de moldagem que determina a geometria de uma peça cerâmica. Para que isto ocorra, a argila usada fica repleta de umidade, logo, é necessário que a peça passe por uma secagem antes de ir para a queima no forno, etapa final da produção. Isto é preciso

para evitar que o produto estoure durante o aumento de temperatura e evitar danos às resistências elétricas, caso se faça uso de fornos elétricos na confecção.

Nas últimas décadas, vários autores indicaram a importância da transferência de calor em diferentes aplicações, como os motores de combustão, as caldeiras e as fornalhas, a título de exemplo. Com os cerâmicos é possível ver a notoriedade do tema uma vez que em sua fabricação possuem processos com variação de temperaturas, a saber, as etapas de queima e secagem, sendo esta última de maior interesse nos estudos devido aos fenômenos envolvidos.

Uma dificuldade encontrada nestes estudos é a existência de poucas soluções analíticas ou exatas disponíveis em literatura. Para encontrar estas soluções, a modelagem matemática, área de conhecimento que estuda a simulação de sistemas reais com o intuito de prever o seu comportamento, tem surgido como interessante ferramenta para resolver problemas. Segundo Silva (2018), a simulação matemática para o processo de secagem permite uma otimização do processo, trazendo economia e redução de tempo. Aliando este método com a simulação computacional, que tem avançado cada vez mais, surge um importante alternativa para o estudo dos mais diversos processos, inclusive para a secagem de cerâmicos, minimizando riscos e custos e proporcionando uma maior eficácia para a produção.

Essas simulações devem envolver a solução de modelos matemáticos capazes de predizer o comportamento do fenômeno observado. Um projeto adequado e seguro impõe a adoção de modelos matemáticos confiáveis e realistas que estejam em harmonia com as características físicas inerentes ao problema. Nisso, a utilização de métodos numéricos e modelizações computacionais se propõem como poderosas ferramentas no estudo dos fenômenos de transferência de calor, porém, ainda são poucos os estudos que envolvem modelagem matemática e simulação numérica.

O modelo de simulação matemática baseado no Método de Monte Carlo (MMC, ou MCM – Monte Carlo Method) pode se mostrar eficaz para os estudos de transferência de calor, já que pode ser usado em problemas de transferência radiativa, aplicando conceitos de probabilidade em fenômenos físicos como emissão, reflexão e a absorção do fóton, por exemplo. Uma aplicação pode ser vista em WANG (1998), que desenvolveu um método híbrido combinando o Método de Monte Carlo e a teoria de difusão, aliando as vantagens da alta precisão do modelo matemático com a velocidade de cálculo da teoria de difusão para meios turvos semi-infinitos, obtendo resultados matemáticos satisfatórios depois de testados.

Observando isto, o MMC pode ser uma poderosa ferramenta no estudo da secagem pois a difusão é um fenômeno físico que pode acontecer durante esta etapa já que durante o processo pode-se ter diferentes formas de migração de umidade nos sólidos, dentre elas, a difusão de líquido. Esta difusão é calculada por um coeficiente que representa a difusividade efetiva, a qual pode intervir na migração interna da água em um objeto e tem o seu valor obtido experimentalmente pelo ajuste de dados (MARTINAZZO et al., 2007).

Neste trabalho pretende-se desenvolver uma modelagem matemática transiente da etapa de secagem de produtos cerâmicos, bem como suas implicações para as demais etapas da produção, aplicando o Método de Monte Carlo na previsão dos resultados. Para isso, será proposto o desenvolvimento de uma modelagem matemática, juntamente com um simulador computacional, partindo dos parâmetros de simulações e dos resultados obtidos para avaliar características numéricas e físicas dos processos de secagem dos cerâmicos e suas soluções. Um exemplo de tal abordagem foi uma nova abordagem dos

fenômenos característicos nos dispositivos semicondutores analisados por microscópio eletrônico de varredura através do Método de Monte Carlo (WEBER, 1987).

Como as simulações computacionais podem desempenhar um importante papel na otimização dos vários processos de desenvolvimento de um produto, reduzindo custos e tornando-o mais eficiente, o MMC pode ser aplicado, dentre outras formas, para calcular a transferência radiativa em um meio não cinzento, usando o fator de transferência de radiação espectral, a título de exemplo. Simultaneamente, a transferência radiativa em um meio isotérmico e não isotérmico com partículas não cinzentas de absorção e emissão anisotrópicas também pode ser calculada através de um modelo não cinzento e vários métodos de aproximação cinzenta (RUAN et al, 2002).

A necessidade do conhecimento físico do problema se justifica para conferir integridade ao modelo analisado e as técnicas de simulação matemática são essenciais para tornar possível o cálculo de equações analíticas de, muitas vezes, difícil solução.

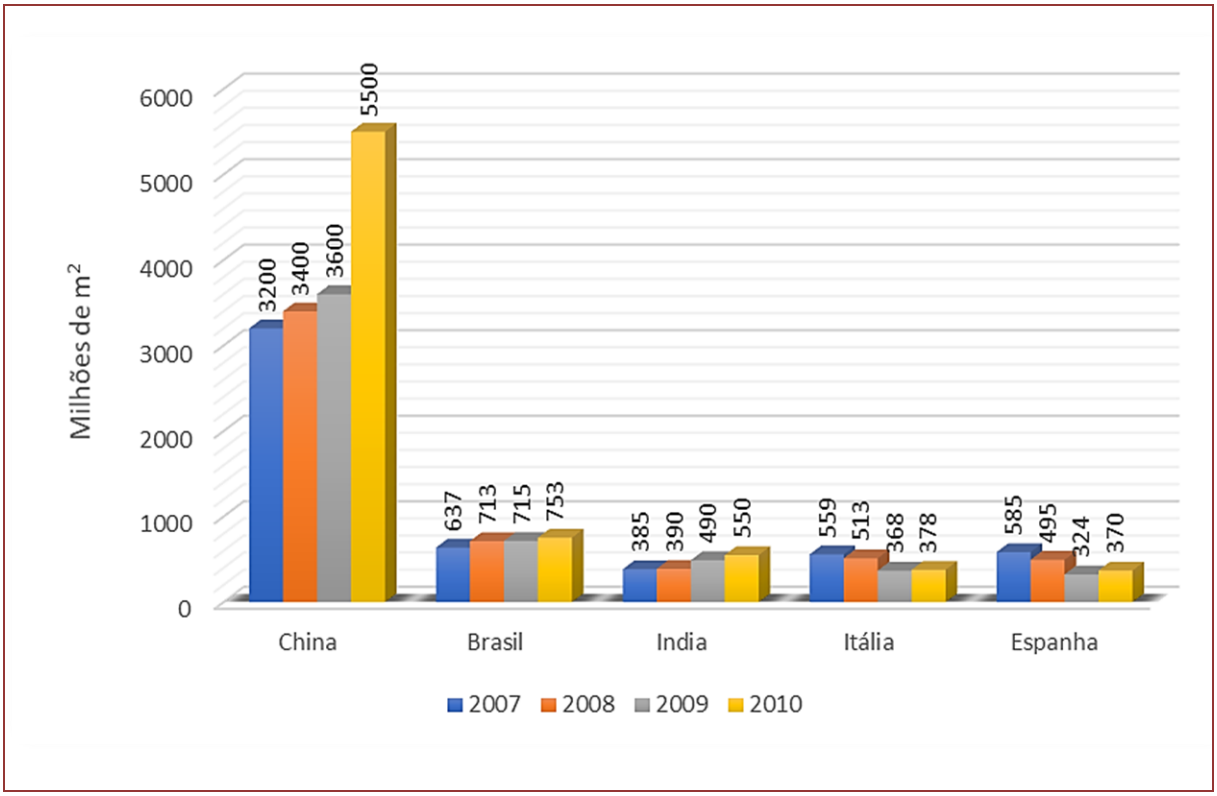
2. CERÂMICOS

A cerâmica é considerada o mais antigo material artificial produzido pela espécie humana. Muitos estudiosos acreditam que a indústria cerâmica foi a mais antiga e a sua história está ligada de maneira particular ao início da civilização como um todo. Para ser considerado como um cerâmico, um material deve ser não metálico, inorgânico, apresente alta dureza e boa estabilidade, seja ela química ou térmica. Estes materiais correspondem a uma classe que apresenta valores baixos para condutividade térmica e elétrica, altas forças de compressão e elevados pontos de fusão. A criação da máquina à vapor e o surgimento do forno anular, conhecido como forno tipo Hoffman, proporcionaram a qualidade da produção dos materiais cerâmicos em nível industrial (KAWAGUTI, 2004).

Os materiais cerâmicos, diferentemente dos metais, apresentam baixa ductilidade, que é a quantidade de deformação que este material pode suportar até se romper. Além disso, também apresentam uma tenacidade baixa, a qual é caracterizada como a energia necessária para levá-lo ao rompimento. Esse tipo de material também mostra propriedades como dureza elevada e resistência a abrasão e corrosão, tornando-os aptos para inúmeras aplicações, como sapatas tensoras na indústria têxtil, isoladores elétricos na indústria eletrônica e automotiva e isolantes térmicos em câmaras de combustão. No Brasil, o setor cerâmico tem grande relevância econômica. No final da década de 90, esta área compreendia cerca de 1% do Produto Interno Bruto (PIB) nacional, algo aproximadamente U$$ 6 bilhões à época, e sendo um terço deste montante representado pelas cerâmicas avançadas, já que o restante era vinculado ao setor cerâmico tradicional (BUSTAMANTE e BRESSIANI, 2000). Na figura 1, é possível observar alguns dos principais produtores mundiais de revestimentos cerâmicos e suas respectivas produções nos anos de 2007 a 2010.

Para se ter noção, de acordo com Da Silva (2017), estima que são fabricados no Brasil, 4 bilhões de unidades de blocos cerâmicos por ano. Isso mostra que o setor de cerâmica estrutural é uma atividade de base na economia nacional uma vez que possibilita as várias atividades da construção civil, da mais simples à mais sofisticada, produzindo telhas, tijolos, blocos, manilhas, lajes e pisos.

Figura 1 - Principais produtores mundiais de revestimentos cerâmicos e suas produções nos anos de 2007 a 2010.



Fonte: Santos (2018) (Adaptado).

Os materiais para a construção civil são os elementos com mais destaque do setor de cerâmicos, mas existem segmentos diferentes que são classificados a partir de diversas propriedades, como a função das matérias-primas e as áreas de aplicação. Estes setores podem ser classificados como: cerâmica vermelha, materiais de revestimento (conhecidos também por placas cerâmicas), cerâmica branca, materiais refratários e isolantes térmicos. Estes últimos podem ainda ser subdivididos em isolantes térmicos não-refratários e fibras ou lãs cerâmicas.

Há também a distinção do segmento de cerâmica tradicional com o de cerâmica avançada, tendo como principal diferença suas matérias primas. A primeira utiliza, basicamente, minerais naturais em sua estrutura, enquanto na segunda existe o desenvolvimento a partir de matérias primas sintéticas com alto grau de pureza (JUNIOR et al., 2019).

3. ARGILA PARA CERÂMICA ESTRUTURAL

Segundo Baccelli Júnior (2010), a principal matéria prima no processo de fabricação da cerâmica estrutural é a argila. Esta é constituída por argilominerais, materiais de origem natural, terrosa, de granulação fina e que, ao serem hidratados, demonstram certo nível de plasticidade (BALDUINO, 2016). Na massa cerâmica, a argila que está em sua composição pode ser categorizada em plástica e não plástica.

A qualidade do produto cerâmico está ligada, sobretudo, à argila utilizada em sua fabricação, com a plasticidade sendo a principal característica que ela deve apresentar ao

ser utilizada na estrutura de uma massa cerâmica. Na cerâmica vermelha, seguimento mais utilizado no país, o ideal é o uso de argilas com baixa plasticidade. Sendo assim, é recomendado a utilização dos argilominerais do tipo ilita, ilita-montmorilonita e clorita-montmorilonita (argilominerais de camadas mistas), caulita, como também, pequenos teores de montmorilonita[3] e compostos de ferro. Também se faz necessária a utilização de argilas que contenham fundentes, uma vez que sua presença provoca uma redução na porosidade do material e promove um aumento em sua resistência mecânica, assim como a diminuição na absorção de água (ALEXANDRE, 2017).

Para o cerâmico adquirir a plasticidade, é necessário adicionar alguma quantidade de água em alguma de suas etapas de preparação. Esta água, posteriormente, vai ser retirada através do processo de secagem. Pinheiro e Holanda (2010) afirmam que entre todos os parâmetros de processamento dos cerâmicos, aqueles que são relacionados com a etapa de secagem e a de queima são os que influenciam diretamente nas propriedades mecânicas desses materiais.

Um importante representante dos cerâmicos estruturais são os blocos cerâmicos, peças que possuem furos em forma de prismas perpendiculares às faces que estão contidos, devendo ser assentados com estes furos na vertical (RIZZATTI et al, 2011). Ainda são poucos os estudos que se concentram nos tijolos ou blocos cerâmicos, mesmo havendo várias pesquisas sobre os materiais cerâmicos.

4. BLOCOS CERÂMICOS ESTRUTURAIS

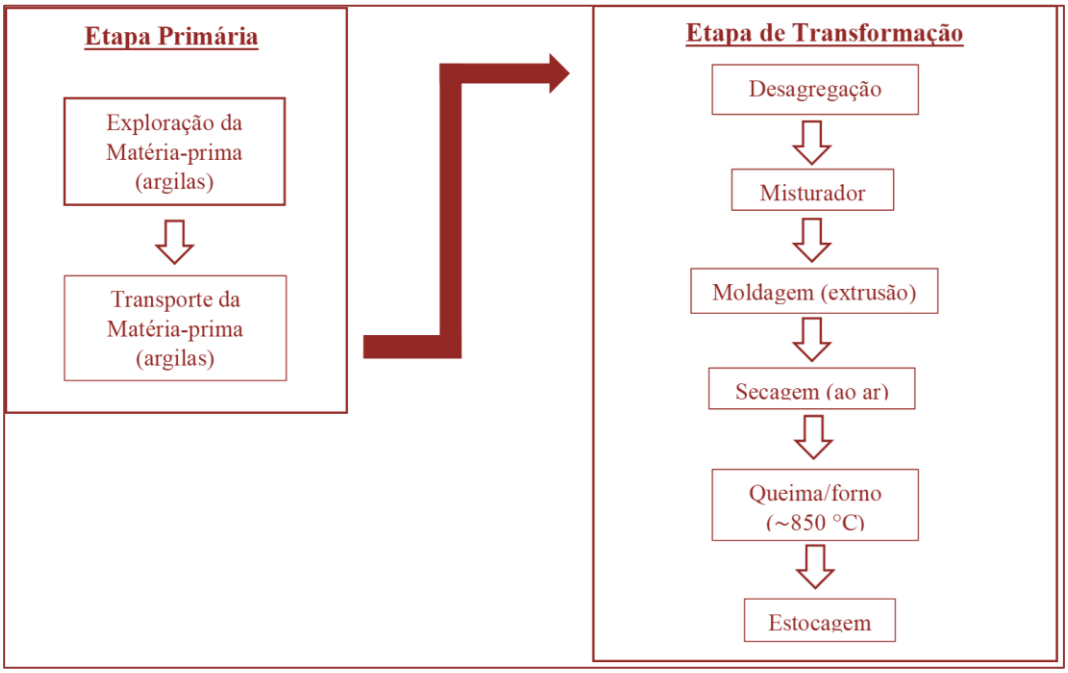
Existe uma grande quantidade de blocos cerâmicos estruturais que diferenciam-se entre si, principalmente em sua geometria, mas que seguem basicamente a mesma forma de produção. Via de regra, a fabricação de uma peça cerâmica segue as seguintes etapas: extração da argila, preparo da argila úmida e moldagem. Esta moldagem pode ser feita com pasta plástica consistente, com pasta plástica mole ou também com o uso de pasta fluida. Segundo Cavalcanti (2010), as principais características apresentadas por estes produtos são a resistência para elevadas temperaturas, condutividade térmica e elétrica baixas e frágil comportamento mediante a tensões.

Mesmo não tendo significativa mudança no decorrer dos anos, a produção dos materiais cerâmicos passou por algumas inovações tecnológicas que tornaram o processo mais eficiente e trouxeram uma qualidade final melhor destes produtos.

Para a cerâmica estrutural, o processo de fabricação é dividido nas etapas de exploração das jazidas, prévio tratamento das matérias-primas, conformação, secagem e queima (SALEIRO E HOLANDA, 2012). Na conformação ocorre uma adição de água na argila para lhe conceder a plasticidade necessária para moldá-la na geometria que se deseja. Na figura 2 é possível visualizar o esquema do processo produtivo de um cerâmico.

[3] A montmorilonita (MMT) é um argilomineral composto por camadas estruturais constituídas por duas folhas tetraédricas de sílica e uma folha central octaédrica de alumina, unidas entre si por átomos de oxigênio comum a ambas as folhas. Disponível em: https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/46800/Resumo_12047.pdf?sequence=1#:~:text=Page%201-,A%20montmorilonita%20(MMT)%20%C3%A9%20um%20argilomineral%20composto%20por%20camadas%20estruturais,e%2020%20%25%20nas%20superf%C3%ADcies%20laterais. Acesso em 11 de dezembro de 2024.

Figura 2 - Esquema de representação do processo produtivo de um cerâmico.



Fonte: Autor.

Conforme Alexandre (2017), esta metodologia pode resumir a fabricação de um bloco cerâmico estrutural em preparação da matéria prima, conformação e tratamento térmico, as quais podem ser entendidas da seguinte forma:

- Preparação da matéria prima: Começa com a extração das argilas em suas jazidas, procedimento realizado, comumente, com o uso de uma máquina retroescavadeira. Também é feita a dosagem, onde a argila é transportada para um caixão alimentador dosador para que ocorram, de forma proporcional, doses de acordo com suas características.
- Conformação Mecânica: É o processo de fabricação propriamente dito de cada tipo de peça cerâmica, divergindo de acordo com as mais diversas geometrias e tamanhos de produtos.
- Tratamento Térmico: Corresponde a etapa final de produção em que abrange duas fases, a secagem e a queima. Na secagem a umidade existente no interior do sólido é eliminada por meio da evaporação. Para que isso ocorra, acontece uma transferência simultânea de calor e massa, resultado de um fornecimento de energia na forma de calor. Com isso, a água contida no material sai do seu interior em direção à superfície, onde é consequentemente evaporada. Na fase de queima ocorre uma aproximação das partículas de argila para que resulte na diminuição da porosidade do material e aumente a resistência da peça final.

No seguimento da construção civil, a alvenaria estrutural necessita dos blocos cerâmicos como um dos primordiais constituintes. Eles ocupam aproximadamente 80% do volume total de uma parede. Na figura 3, pode se observar um tipo de bloco cerâmico estrutural depois de finalizado.

Segundo Alexandre (2017), são os blocos estruturais que vão definir a resistência da estrutura e, por isso, é necessário evitar possíveis defeitos que acarretem danos sérios, o que pode ser feito com um controle de qualidade rigoroso destas peças.

Figura 3 - Representação de um tipo de bloco cerâmico estrutural depois de pronto.

Fonte: Disponível em: https://pauluzzi.com.br/blocos-ceramicos-estruturais/. Acesso em 11 de dezembro de 2024.

5. SECAGEM

O processo de secagem descreve um fenômeno térmico em que ocorre a remoção da umidade para que se obtenha um produto seco. Além da retirada de água, o objetivo deste processo é baixar para o mínimo o consumo de energia, que envolve tempo, qualidade e gasto energético do produto, parâmetros importantes e que precisam de atenção (AKYOL et al., 2013).

Segundo Sander (2003), o processo é complexo e envolve, de maneira simultânea, a transferência de calor e de massa para que ocasione a remoção da umidade presente no interior de um sólido poroso removendo para a superfície, onde ocorrerá sua evaporação no meio em que está contido o material. Especificadamente para o caso da secagem de materiais cerâmicos, ocorre a remoção da água que foi introduzida na etapa de conformação.

A secagem, de acordo com Su (1997), pode ser dividida em duas etapas, onde na primeira ocorre a transferência de calor para o sólido e na segunda fase compreende a velocidade do ar de secagem, a qual está estreitamente ligada com as propriedades do sólido a ser seco. Conforme Brito (2016) e Lima (2017), esse processo varia de acordo com a forma e as características do sólido e também com o teor de umidade inicial, podendo ser entendido da seguinte maneira:

Estágio 0: etapa em que ocorre a acomodação do material, onde o sólido entra em regime operacional. A transferência de massa e a velocidade de secagem são relativamente baixas;

Estágio 1: a taxa de secagem, a pressão parcial do vapor e a temperatura do sólido permanecem constantes. A transferência de massa vai ser influenciada pelas condições externas ao produto;

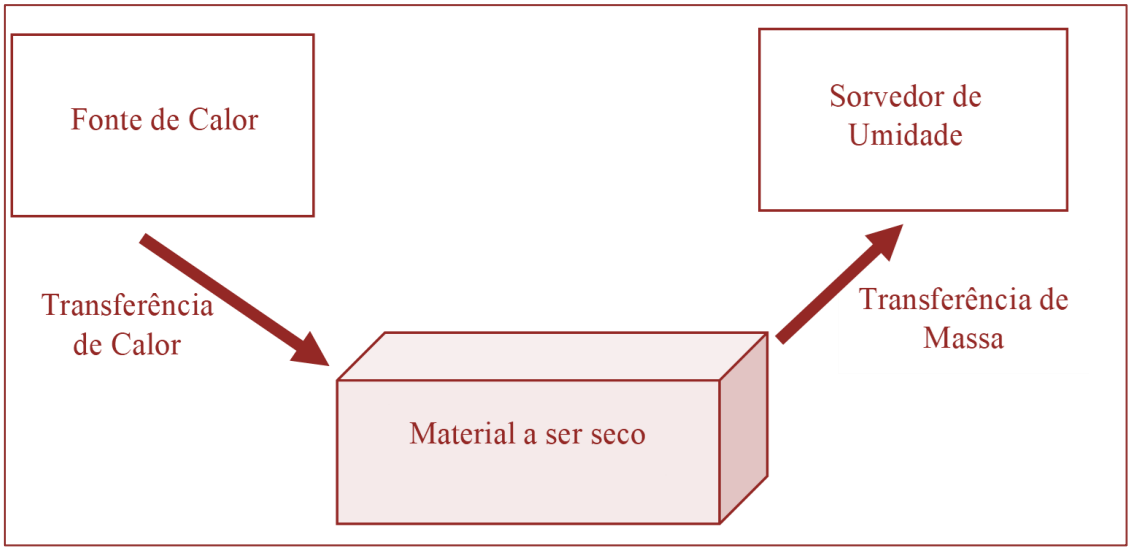
Estágio 2: acontece um decréscimo na taxa de secagem e a superfície do sólido passa a ter uma quantidade de líquido menor do que a evaporação, resultando na diminuição da velocidade de secagem. Há uma redução na transferência de massa e um aumento na temperatura do sólido já que a umidade foi diminuída.

O movimento da água, do interior para a superfície do sólido, pode ocorrer na forma líquida, na forma de vapor ou ambas as duas, dependendo do tipo do produto e do seu percentual de umidade. Para Lima (2017), os mecanismos de transporte da água do interior de um sólido qualquer para sua superfície, podem ser, seguindo literatura já exposta:

- Transporte por difusão líquida: se dá por causa dos gradientes de concentração de água no material;
- Transporte por difusão de vapor: ocorre devido aos gradientes de concentração de água, mas também pela pressão parcial do vapor que é causada por gradientes de temperatura;
- Transporte por efusão (ou escoamento Knudsen): quando o diâmetro médio dos poros do material, por onde o vapor migra, for equivalente ao tamanho das moléculas que compõem o vapor, acontece este fenômeno;
- Transporte de vapor por termo-difusão: ocorre devido os gradientes de temperatura;
- Transporte de líquido por forças capilares;
- Transporte de líquido por pressão osmótica;
- Transporte de líquido por gravidade;
- Transporte de líquido e vapor: causado pela pressão externa, pela contração, a alta temperatura e a capilaridade, ocorre devido à diferença de pressão total;
- Transporte por difusão superficial: acontece pela migração do líquido e do vapor pelos poros da superfície do sólido.

Para que possa ocorrer de maneira uniforme, o processo de secagem deve acontecer de maneira controlada, o que evita gradientes de umidade e de temperatura elevados no interior do material. Tal acontecimento pode provocar a perda da qualidade do produto, obtendo peças com defeitos estruturais, rachaduras, fissuras e outras deformações caso a taxa de secagem, parâmetro principal deste processo, não for controlada. A figura 4 mostra a representação do processo de secagem de forma simplificada.

Figura 4 - Representação do processo de secagem



Fonte: Autor.

A desidratação, outra forma de se denominar a secagem, retira a umidade de materiais, naturais ou industriais, até um teor de umidade específico para elevar o tempo de rendimento e minimizar os custos operacionais para que a qualidade do produto aumente (DEFRAEYE, 2014). Segundo Goneli et al. (2007), a redução do teor de umidade é um fenômeno que envolve o movimento hidráulico do interior para a superfície do material por meio de mecanismos diferentes de transferência de calor e massa, o que pode alterar de forma substancial a qualidade e as propriedades físicas do produto, dependendo das condições de secagem e do método empregado. Visto isso, é crucial entender os diferentes métodos de secagem e como funcionam.

6. MÉTODOS DE SECAGEM

Os métodos de secagem podem ser classificados quanto ao uso de equipamentos no processo, podendo ser natural ou artificial, quanto à periodicidade no fornecimento de calor, que pode ser contínuo ou intermitente, ou ainda à movimentação da massa do produto a ser secado, sendo estacionário ou contínuo.

No método de secagem natural, o material a ser seco é exposto ao sol, ou a sombra, em um ambiente que seja relativamente seco, para que a água em seu interior seja removida por meio de evaporação. É imperativo para isto ocorrer que o produto esteja disposto em terreiros de cimento, como alguns tipos de secagem de café, ou sobre tabuleiros, precisando revolvê-lo constantemente. De acordo com Colinart (2012), esta metodologia é uma alternativa que reduz significativamente o consumo de energia e proporciona uma melhor eficiência energética, evitando poluição e, consequentemente, sem prejudicar a saúde das pessoas e a natureza.

Como a secagem natural depende de fatores climáticos, surge como alternativa a secagem artificial, que pode ser executada em temperaturas controladas. Este tipo de secagem adapta-se muito bem aos esquemas de produção de sementes e materiais cerâmicos, apresentando uma secagem rápida e capaz de remover altos índices de água

nos produtos. Estes métodos artificiais de secagem podem ser classificados em contínuo, intermitente ou estacionário, também chamado de leito fixo.

Uma das principais vantagens desta abordagem é preservar a qualidade do material, já que é mais fácil obedecer a critérios técnicos para se obter produtos melhores. Isto se dá, pois, a água é removida do interior das peças pelo aquecimento com ar convectivo (LERTWORASIRIKU e TIPSUWAN, 2008). Um exemplo é a exposição a elevadas temperaturas de sementes por um período não prolongado e controlar determinados limites para esta elevação de temperatura (BERTI et al., 2005).

6.1. SECAGEM DOS MATERIAIS CERÂMICOS

Na produção dos produtos cerâmicos, a secagem é a etapa da produção na qual retira-se a água adicionada à argila durante sua homogeneização. É uma etapa de extrema importância e se faz necessário conhecer os impactos que são causados por esse processo, já que propriedades físicas e químicas da peça são alteradas significativamente (DA SILVA et al, 2013). É natural que a perda de água nessa etapa provoque a retração e variações nas dimensões no produto, pois a secagem é responsável pela remoção do solvente que foi adicionado e na retirada são geradas tensões que podem causar defeitos irreversíveis na peça, porque a retração possui uma relação linear com o teor de umidade. Este fator é muito significativo nesta etapa (DA SILVA NASCIMENTO et al., 2019).

De maneira geral, pode-se utilizar vários métodos de conformação para obter formatos variados e de diferentes classificações deste tipo de material, como por exemplo, a prensagem, a extrusão, a colagem, a usinagem e a injeção. Devido às estruturas cristalinas com ligações fortes nas três direções dos materiais cerâmicos mais resistentes mecanicamente e mais estáveis quimicamente, elas podem ser iônicas e parcialmente covalentes e conferem as cerâmicas uma estabilidade relativamente alta. Considerando isso, a temperatura de fusão das cerâmicas é superior à dos metais e dos materiais orgânicos (CALLISTER JUNIOR e RETHWISCH, 2002; VAN VLACK, 1970). Logo, é perceptível como os processos térmicos são importantes em sua produção, o que faz necessário entender como eles funcionam. Nesse intuito, das diferentes formas de transferência de calor, este trabalho vai se interessar principalmente na radiação, a qual tem um importante papel em diversos setores da produção de materiais e em tecnologias e do cotidiano.

A radiação solar é um exemplo de fundamental importância deste fenômeno para a manutenção da vida na Terra, mas existem também aplicações em outras áreas, como os fornos, que são usados em operações diversas. Uma destas operações ocorre com os materiais cerâmicos, mais precisamente em sua etapa de secagem. O estudo da transferência de calor por radiação pode ser dado através da solução da Equação de Transferência Radiativa (ETR). Neste tipo de análise deve-se considerar um meio homogêneo, o emissor, o absorvedor, com existência de espalhamento, com propriedades radiativas de dependência espectral e em equilíbrio termodinâmico. Através disso, é possível calcular as trocas de energia entre interfaces, ou seja, entre as paredes e fronteiras do meio. Outra via de estudo é a equação de transferência radiativa em um meio espalhador, a qual tem sido muito estudada, porém, soluções analíticas nem sempre são possíveis, fazendo com que o desenvolvimento de soluções numéricas seja necessário para o desenvolvimento desse método.

Segundo Silva (2018), se faz necessário aumentar a resistência mecânica do produto cerâmico e garantir que haja uma uniformidade térmica e uma distribuição homogênea da umidade no interior destes materiais, para isso, se faz necessário reduzir a umidade média, que tem um papel importante durante a conformação mas depois torna-se desfavorável, para valores inferiores a 1%. A curva de Bigot mostra a representação gráfica da retração linear de uma peça durante a secagem em função da perda de água de conformação. Através desse parâmetro pode se estabelecer um ciclo de secagem que permitirá uma otimização do processo para que os produtos finais não tenham defeitos e não permaneçam secando por períodos maiores que os necessários (VIEIRA et al., 2003).

Ainda existe uma considerada escassez de modelos matemáticos que descrevam, eficientemente, o processo de secagem, uma vez que há uma falta de padronização para a grande quantidade de produtos cerâmicos (SANTOS, 2018). Porém, as simulações e modelagens matemáticas podem ser uma estratégia para resolução destes problemas.

Considerando o que já visto, a secagem consiste na retirada do líquido existente no interior do sólido por meio de evaporação, processo que só pode ocorrer devido a diversos fenômenos físicos, como o processo de transferência de calor e massa. Isso se dá, pincipalmente, de modo difusivo, onde a transferência de matéria ou energia ocorre pelo movimento molecular e pela existência de um gradiente de concentração de uma substância ou de temperatura, enquanto o meio permanece estacionário.

Este processo pode ser simulado antes de sua realização a partir da criação de códigos computacionais, o que torna possível um maior e melhor controle desse fenômeno e permite uma otimização na produção, reduzindo perdas, diminuindo custos, evitando o desperdício de matérias primas e minimizando o consumo de energia. Sendo assim, fazer a modelagem matemática para as secagens tem sido o principal foco de muitas pesquisas nos últimos anos (FAUSTINO, 2016).

O uso da simulação matemática para descrever o processo de secagem tem se mostrado de maior vantagem em relação às investigações feitas de modo experimental, realizadas em laboratório. Tal fato ocorre, especialmente, pela possibilidade de um controle adequado sobre o processo, já que com o uso da simulação pode-se observar e quantificar o fluxo de calor e de massa, no interior e na superfície, do produto em função do tempo em que acontece a secagem (ARAÚJO et al, 2020). De acordo com Silva (2018), os modelos matemáticos mais utilizados têm base nas propriedades termofísicas, nas cinéticas de secagem, no balanço de massa e na energia do secador usado, o que mostra a necessidade de uma equação para descrever a cinética de secagem envolvida em condições operacionais previamente estabelecidas. Em suma, as modelagens matemáticas que descrevem o fenômeno da secagem dependem da espessura de camada do material estudado, podendo ser constituídos de uma camada fina ou uma camada espessa, e podem ser divididos em modelos distribuídos e modelos de análise concentrada, estes últimos sendo classificados como empíricos, semi-empíricos ou teóricos (SANTOS, 2019).

Mesmo sendo bastante estudado, o processo da secagem de materiais cerâmicos ainda não teve abordagem significativa com a utilização do Método de Monte Carlo, o qual serve para construir modelos matemáticos a partir da aleatoriedade do evento e que já serviu, e ainda serve, como importante ferramenta em outras áreas, alcançando resultados notáveis.

6.2. MÉTODO DE MONTE CARLO

Algumas padronizações matemáticas podem ser adotadas para facilitar a solução de vários problemas. Por exemplo, simplificar as características do meio considerando-o como meio homogêneo, evitando parâmetros desnecessários. Estas simplificações podem dar resultados satisfatórios para a condição real analisada, dependendo da aproximação do modelo teórico com o caso real. As técnicas do Método de Monte Carlo (MMC) fornecem boas aproximações para uma solução, mesmo apresentando, inicialmente, um elevado tempo computacional para ser construído (CHURMAKOV et al., 2003). Estes métodos são baseados na expansão de uma solução em um número grande de termos para que ocorra sua convergência. Via de regra, determinando os dados estatísticos do processo aleatório, faz-se uma aproximação das variáveis desconhecidas. Existindo a solução analítica, ela será sempre usada como solução de referência para análises comparativas de resultados.

O método leva este nome devido à famosa roleta de cassino em Monte Carlo, no Principado de Mônaco, onde são notórias a aleatoriedade e a natureza repetitiva das atividades realizadas nos cassinos. O MMC tem sido utilizado há algum tempo na tentativa de se obter aproximações numéricas de funções complexas. Tipicamente, envolve observações de alguma distribuição de probabilidades e o uso da amostra obtida para realizar uma aproximação da função de interesse do estudioso. O método, também referido como simulação estocástica, é de possível implementação em diferentes cenários.

O primeiro trabalho registrado usando o método de Monte Carlo foi publicado em 1947, por Jon Von Neuman e Stanislaw Ulam. Conforme os autores (ULAM et al., 1947) e posteriormente em (METROPOLIS e ULAM, 1949), foi proposto usar uma simulação computacional em parte do projeto Manhattan, na Segunda Guerra Mundial. O projeto visava a construção da bomba atômica onde, para a resolução, os cientistas levantaram a possibilidade de utilizar o método realizando simulações de problemas com natureza probabilística que tivessem relação com o coeficiente de difusão do nêutron em alguns cenários.

A determinação dos dados estatísticos do processo aleatório com MMC faz-se a partir da aproximação das variáveis desconhecidas provindos da solução de um problema (BUSLENKO e SHREIDER, 1966). A forma como esses dados são utilizados é o que varia de um campo de aplicação para o outro, por isso, existem sub-métodos de MMC. O seu uso mais comum costuma ser quando é impossível ou impraticável calcular resultados exatos através de um algoritmo determinístico.

De maneira geral, um sistema de eventos discretos pode ser definido como o sistema no qual a variável do tempo é discreta e as variáveis de estado podem ser discretas ou contínuas. Logo, um sistema de eventos contínuos é o sistema no qual o tempo é uma variável contínua e todas as variáveis de estado são contínuas. Sendo assim, um sistema de eventos discretos tem como característica essencial que seu estado, entre pontos discretos consecutivos, se mantém inalterado. Esse entendimento é necessário na simulação de um processo para este tipo de modelo pois é necessária que somente avance o tempo de um evento para o próximo, sem se preocupar com tempos intermediários.

Pode se destacar a aplicação e eficácia do Método de Monte Carlo em áreas como Finanças, na modelagem e simulação de um mercado de opção (ECCA et al, 2008), (BOYLE, 1977); na Engenharia, na gestão de portfólio de uma empresa de seguros (NORGAARD, 1966) ou na análise de um problema de estoque (RAUN, 1963); na Biologia, usado para a biologia de sistemas de tratamento de câncer (WIERLING et. al, 2012), para estratégias de

otimização e paralelização com simulação de uma infecção pelo HIV (HECQUET, RUSKIN e CRANE 2007), dentre inúmeras outras aplicações na Física, Química e Medicina.

Para visualizar melhor o método, suponha que se queira estimar um parâmetro θ, que é o valor esperado de alguma variável aleatória X. Ele pode ser dado da seguinte forma,

$$\theta = E(X). \qquad (1)$$

Agora, suponha que além disso, possam ser gerados valores de variáveis aleatórias independentes com a mesma distribuição de probabilidade de X. Cada vez que for gerado um novo valor, diz-se que uma simulação foi concluída. Suponha também que vão ser realizadas n simulações gerando X_1 , X_2 , ..., X_n. Logo, se

$$\bar{X} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} X_i, \qquad (2)$$

for sua média, então pela lei forte dos grandes números[4], $\bar{X}$ será usado como um estimador para θ. Para o valor esperado tem-se

$$E(\bar{X}) = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} E(X_i) = \theta. \qquad (3)$$

Fazendo

$$\sigma^2 = Var(X), \qquad (4)$$

tem-se

$$Var(\bar{X}) = \frac{\sigma^2}{n}. \qquad (5)$$

Além do exposto, pelo Teorema Central do Limite[5], se n for grande, $\bar{X}$ terá uma distribuição normal aproximada. Logo, se σ/n é pequeno, então $\bar{X}$ tende a estar próximo de θ e, quando n for grande, $\bar{X}$ será um bom estimador para θ. Esta abordagem para se estimar um valor esperado pode ser vista com mais detalhes em (ROSS, 2011) e (RUBINSTEIN, 2016).

[4] A Lei dos Grandes Números versa que a média aritmética dos resultados da realização da mesma experiência repetidas vezes tende a se aproximar do valor esperado à medida que mais tentativas se sucederem. Disponível em: https://portal.ifba.edu.br/valenca/cursos/superior/comat/documentos/tcc/TCCThas.pdf. Acesso em 15 de dezembro de 2024.

[5] O Teorema Central do Limite (TCL) afirma que a soma (S)de N variáveis aleatórias independentes (X), com qualquer distribuição e variâncias semelhantes, é uma variável com distribuição que se aproxima da distribuição de Gauss (distribuição normal) quando N aumenta. Disponível em: https://www.if.ufrgs.br/~lang/Textos/Teorema_Central_Limite.pdf. Acesso em 15 de dezembro de 2024.

O MMC apresenta bons resultados para problemas que envolvem transferência radiativa, conforme literatura já exposta, e possui várias aplicações práticas, tais como medir a quantidade de luz absorvida em uma solução química e problemas atmosféricos que envolvam valores de radiação solar direta, além de poder ser usado para cálculo das propriedades termodinâmicas de um sistema macroscópico, como pressão, volume e temperatura. Estes fatos tornam o método considerável para o estudo da secagem de materiais cerâmicos.

7. CONCLUSÕES

Em conclusão, os estudos com a simulação do Método de Monte Carlo (MMC) mostram-se promissores para aplicações na secagem de cerâmico, e especificadamente, na secagem de blocos estruturais, uma área que demanda soluções inovadoras e configurações eficientes. A necessidade de integrar de forma eficaz o MMC com a secagem de cerâmicos exige uma abordagem de projeto iterativa e multidisciplinar, em razão do comportamento termomecânico desses materiais. Diversas simulações já foram desenvolvidas para maximizar o processo de secagem, contando com ferramentas de análise e projeto para otimizar o desempenho e minimizar os gastos e o consumo de energia. Alternativas com MMC se mostram promissoras pois podem trazer um entendimento mais amplo na secagem de materiais com geometrias arbitrárias, mostrando que o fenômeno de transferência de calor e massa pode ser estudado sem a preocupação do formato do objeto a ser estudado, para melhorar a eficiência energética durante a produção deste tipo de material.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio da Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico(CNPQ) e da Universidade Federal de Campina Grande, pelo apoio, fomento e ajuda para o desenvolvimento da pesquisa apresentada.

REFERÊNCIAS

[1] AKYOL, U.; KAHVECI, K.; CIHAN, A. Determination of optimum operating conditions and simulation of drying in a textile drying process. Journal of The Textile Institute, v. 104, n. 2, p. 170-177, 2013.

[2] ALEXANDRE, C. A. B. Caracterização dos blocos cerâmicos estruturais produzidos no Estado do Ceará. 2017. 62f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

[3] ALMEIDA, G. S. Simulação e experimentação da secagem de cerâmica vermelha em sistemas térmicos industriais. 2009. 211f. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos). Programa de Pós-graduação em Engenharia de Processos, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.

[4] ARAÚJO, M. D. V.; CORREIA, B. B.; BRANDÃO, V. A. A.; DE OLIVEIRA, I. R.; SANTOS, R. S.; NETO, G. L. D. O.; SILVA, L. P. D. L.; DE LIMA, A. G. B. Convective Drying of Ceramic Bricks by CFD: Transport Phenomena and Process Parameters Analysis. Energies, v. 13, n. 2073, 2020.

[5] BACCELLI JÚNIOR, G. Avaliação do processo industrial da cerâmica vermelha na região do Seridó-RN. 2010. 200f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal - RN.

[6] BALDUINO, A. P. Z. Estudo da caracterização e composição de argilas de uso cosmético. 2016. 57f. Dissertação (Mestrado em Ciências Aplicadas à Saúde). Programa de Pós-graduação em Ciências Aplicadas à Saúde, Universidade Federal de Goiás, Jataí.

[7] BERTI, M.; AHRENS, D. C.; BEUSSO, D. R. Secagem estacionária de sementes de trigo com utilização de gás liquefeito de petróleo. Revista Brasileira de Sementes, v. 27, n.2, p.81-86, 2005.

[8] BIGNAMI, A.; CUPINI, E. A Monte Carlo method for finite difference equations of elliptic type in a multiregion domain. Journal of Computational and Applied Mathematics, v. 8, n. 2, p. 87-92, 1982.

[9] BOYLE, P. P. Options: A monte carlo approach. Journal of financial economics, v. 4, n. 3, p. 323-338, 1977.

[10] BRITO, M. K. T. Estudo teórico da transferência de calor e massa na secagem de tijolos cerâmicos com forma paralelepipédica 2016. 111f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Campina Grande Campina Grande - PB.

[11] BUSLENKO, N. P.; SHREIDER, IU. A. The Monte Carlo method: the method of statistical trials. Pergamon Press, Oxford, 1966.

[12] BUSTAMANTE, G. M.; BRESSIANI, J. C. A indústria cerâmica brasileira. Cerâmica Industrial, v. 5, n. 3, p. 31-36, 2000.

[13] CALLISTER JUNIOR, W. D.; RETHWISCH, D. G. Ciência e engenharia de materiais: uma introdução. Rio de Janeiro: LTC, v. 589, p. 249, 2002.

[14] CAVALCANTI, M. S. L. Desenvolvimento de massas cerâmicas para grés sanitários utilizando resíduo de vidro plano como fundente em substituição parcial ao feldspato. 2010. 159f. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos). Programa de Pós-graduação em Engenharia de Processos, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.

[15] CHURMAKOV, D. Y.; MEGLINSKI, I. V.; PILETSKY, S. A.; GREENHALGH, D. A. Analysis of skin tissues spatial fluorescence distribution by the monte carlo simulation. Journal of Physics D: Applied Physics, v. 36, n. 14, p. 1722, 2003.

[16] COLINART, T.; GLOUANNEC, P; CHAUVELON, P. Influence of the setting process and the formulation on the drying of hemp concrete. Construction and Building materials, v. 30, p. 372-380, 2012.

[17] DA SILVA, A. C.; MÉXAS, M. P.; QUELHAS, O. L. G. Restrictive factors in implementation of clean technologies in red ceramic industries. Journal of cleaner production, v. 168, p. 441-451, 2017.

[18] DA SILVA, L. D.; DA SILVA, W. P.; SILVA, C. M. D. P. S.; FARIAS, V. S. O. Descrição da secagem de placas cerâmicas por meio de um modelo de difusão. Cerâmica, v. 59, p. 409-416, 2013.

[19] DA SILVA, S. K. B. M.; DE ARAÚJO, C. J.; DE LIMA, A. G. B. Análise numérica da variação dimensional em blocos cerâmicos estruturais durante o processo de secagem. Research, Society and Development, v. 10, n. 6, p. e33310615680-e33310615680, 2021.

[20] DA SILVA NASCIMENTO, J. J.; LUNA, C. B. B.; COSTA, R. F.; BARBIERI, L. F. P.; BEZERRA, E. D. O. T. Evaluation of red clay and ball clay drying using transient threedimensional mathematical modeling: volumetric shrinkage and moisture content. Materials Research Express, v. 6, n. 9, p. 095206, 2019.

[21] DEFRAEYE T. Advanced computational modelling for drying processes – A review. Applied Energy, v.131, p. 323-344, 2014.

[22] ECCA, S.; MARCHESI, M.; SETZU, A. Modeling and simulation of an artificial stock option market. Computational Economics, v. 32, n. 1, p. 37-53, 2008.

[23] FAUSTINO, D. B. L. Secagem de tijolos cerâmicos no formato de paralelepípedo: teorias de secagem. 2016. 26f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil). Unidade Acadêmica de Engenharia Civil, Universidade Estadual da Paraíba, Araruna.

[24] GONELI, A. L. D.; CORRÊA, P. C.; RESENDE, O.; REIS NETO, S. A. D. Estudo da difusão de umidade em grãos de trigo durante a secagem. Food Science and Technology, v. 27, n.1, p.135-140, 2007.

[25] HAJI-SHEIKH, A.; SPARROW, E. M. The floating random walk and its application to Monte Carlo solutions of heat equations. SIAM Journal on Applied Mathematics, v. 14, n. 2, p. 370-389, 1966.

[26] HAJI-SHEIKH, A.; SPARROW, E. M. The solution of heat conduction problems by probability methods. ASME Journal of Heat Transfer. v. 89, n. 2, p. 121-130, 1967.

[27] HECQUET, D.; RUSKIN, H. J.; CRANE, M. Optimisation and parallelisation strategies for Monte Carlo simulation of HIV infection. Computers in Biology and Medicine, v. 37, n. 5, p. 691-699, 2007.

[28] HOWELL, J. R. The Monte Carlo method in radiative heat transfer. ASME Journal of Heat Transfer, v. 120, n. 3, p. 547-560, 1998.

[29] JUNIOR, M. C.; AZEVEDO, P. B. M.; CUCHIERATO, G.; MOTTA, J. F. M. Estudo estratégico da cadeia produtiva da indústria cerâmica no estado de São Paulo: Parte I – introdução e a indústria de cerâmica vermelha. Cerâmica Industrial, v. 24, n. 1, p. 20-34, 2019.

[30] KAWAGUTI, W. M. Estudo do comportamento térmico de fornos intermitentes tipo "paulistinha" utilizados na indústria de cerâmica vermelha. 2004. 100f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis- SC.

[31] LERTWORASIRIKUL, S.; TIPSUWAN, Y. Moisture content and water activity prediction of semi-finished cassava crackers from drying process with artificial neural network. Journal of Food Engineering v. 84, n.1, p. 65-74, 2008.

[32] LIMA, W. M. P. B. Transferência de calor e massa em sólidos porosos com geometria complexa via análise concentrada: modelagem e simulação. 2017. 107f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.

[33] MARTINAZZO, A. P.; CORRÊA, P. C.; MELO, E. C.; BARBOSA, F. F. Difusividade efetiva em folhas de Cymbopogon citratus (DC.) Stapf submetidas à secagem com diferentes comprimentos de corte e temperaturas do ar. Revista Brasileira de Plantas Medicinais, v.9, p.68-72, 2007.

[34] METROPOLIS, N.; ULAM, S. The monte carlo method. Journal of the American statistical association, v. 44, n. 247, p. 335-341, 1949.

[35] MUNZ, D.; FETT, T. Ceramics: mechanical properties, failure behaviour, materials selection. Springer Science & Business Media, 1999.

[36] NORGAARD, R. L. A monte carlo simulation in insurance company portfolio management. Journal of Risk and Insurance, v. 33, n. 3, p. 459-467, 1966.

[37] PAULA, R. R. Método de Monte Carlo e aplicações. 2014. 83f. Trabalho de Conclusão Curso (Graduação em Matemática). Instituto de Ciências Exatas - ICEx, Universidade Federal Fluminense, Volta Redonda.

[38] PEREIRA, M. G. M. V. Avaliação de regras de combinação na predição da adsorção de hidrocarbonetos utilizando o método Monte Carlo. 2017. 96f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

[39] PINHEIRO, B. C. A.; HOLANDA, J. N. F. Efeito da temperatura de queima em algumas propriedades mecânicas de cerâmica vermelha. Cerâmica, v. 56, p. 237-243, 2010.

[40] PRADO, U. S.; BRESSIANI, J. C. Panorama da indústria cerâmica brasileira na última década. Cerâmica Industrial, v. 18, n. 1, p. 7-11, 2013.

[41] RAUN, D. L. The application of monte carlo analysis to an inventory problem. The Accounting Review, American Accounting Association, v. 38, n. 4, p. 754-758, 1963.

[42] RICE, R. W. Mechanical properties of ceramics and composites: grain and particle effects. CRC Press, 2000.

[43] RIZZATTI, E.; ROMAN, H. R.; MOHAMAD, G.; NAKANISHI, E. Y. Tipologia de blocos cerâmicos estruturais: influência da geometria dos blocos no comportamento mecânico da alvenaria. Matéria (Rio de Janeiro), v. 16, n. 2, p. 730-746, 2011.

[44] ROSS, S. M. An Elementary Introduction to Mathematical Finance. Cambridge University Press, 2011.

[45] RUAN, L.; TAN, H.; YAN, Y. A monte carlo (MC) method applied to the medium with nongray absorbing-emitting-anisotropic scattering particles and gray approximation. Numerical Heat Transfer: Part A: Applications, v. 42, n. 3, p. 253–268, 2002.

[46] RUBINSTEIN, R. Y.; KROESE, D. P. Simulation and the Monte Carlo method. John Wiley & Sons, 2016.

[47] SALEIRO, G. T.; HOLANDA, J. N. F. Processing of red ceramic using a fast-firing cycle. Cerâmica, v. 58, p. 393-399, 2012.

[48] SANDER, A.; SKANSI, D.; BOLF, N. Heat and mass transfer models in convection drying of clay slabs. Ceramics International, v. 29, n. 6, p. 641-653, 2003.

[49] SANTOS, J. P. S. Secagem de materiais cerâmicos com forma complexa: um estudo teórico via CFX. 2018. 93f. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos). Programa de Pós-graduação em Engenharia de Processos, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.

[50] SANTOS, R. S. Estudo do processo de secagem de blocos cerâmicos estruturais: modelagem e simulação. 2019. 216f. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos). Programa de Pós-graduação em Engenharia de Processos, Universidade Federal de Campina Grande Campina Grande.

[51] SILVA, A. M. V. Secagem de blocos cerâmicos industriais: modelagem, simulação e experimentação 2018. 187f. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos). Programa de Pós-graduação em Engenharia de Processos, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.

[52] SU, S. L. Modeling of multi-phase moisture transfer and induced stress in drying clay bricks. Applied Clay Science, v. 12, n. 3, p. 189-207, 1997.

[53] ULAM, S.; RICHTMYER, R. D.; VON NEUMANN, J. Statistical methods in neutron diffusion. LAMS-551, Los Alamos National Laboratory, p. 1-22, 1947.

[54] VAN VLACK, L. H. Princípios de Ciências dos Materiais. São Paulo: Editora Blucher, 1970.

[55] VIEIRA, C. M. F.; FEITOSA, H. S.; MONTEIRO, S. N. Avaliação da secagem de cerâmica vermelha através da curva de bigot. Laboratório de Materiais Avançados (LAMAV), Universidade Estadual do Norte Fluminense (UENF – RJ), 2003

[56] WANG, L. V. Rapid modeling of diffuse reflectance of light in turbid slabs. JOSA A, v. 15, n. 4, p. 936–944, 1998.

[57] WEBER, G. Aplicação do método monte carlo ao estudo da corrente induzida por feixe eletrônico em dispositivos semicondutores. 1987. Dissertação (Mestrado em Física). Instituto de Física Gleb Wataghin . Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

[58] WIERLING, C.; KÜHN, A.; HACHE, H.; DASKALAKI, A.; MASCHKE-DUTZ, E.; PEYCHEVA, S.; LI, J.; HERWIG, R.; LEHRACH, H. Prediction in the face of uncertainty: a Monte Carlo-based approach for systems biology of cancer treatment. Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis, v. 746, n. 2, p.163-170, 2012.

[59] YORIYAZ, H. Método de Monte Carlo: princípios e aplicações em Física Médica. Revista Brasileira de Física Médica, v. 3, n. 1, p. 141-149, 2009.

Capítulo 2

Secagem de tijolos argilosos industriais: análise termofluidodinâmica via CFD

Adriano de Sousa Cabral[1]
Morgana de Vasconcellos de Araújo[2]
Antonio Gilson Barbosa de Lima[3]

Resumo: A pandemia da Covid-19 trouxe desafios econômicos globais, impactando empresas com altos custos operacionais, como a indústria ceramista, fortemente afetada pelo aumento da tarifa de energia elétrica. Problemas como escassez de matérias-primas, atrasos logísticos e altos custos energéticos, demandam ajustes produtivos. Este estudo analisou a transferência de calor e massa na secagem de três tijolos cerâmicos, argilosos e vazados em série, utilizando Dinâmica dos Fluidos Computacional e Modelagem Matemática. Além disso, foram realizadas simulações à 80°C, as quais, avaliaram a secagem simultânea dos tijolos em uma estufa, investigando a cinética de aquecimento e a secagem conforme o número de peças. Os resultados indicam gradientes significativos de temperatura e umidade, potencialmente geradores de fissuras, trincas e deformações, além de mostrar que a difusividade mássica varia com a temperatura. Além do mais, a disposição e quantidade de tijolos na estufa, afetam diretamente os campos de umidade e temperatura, impactando a qualidade final do produto. Constatou-se ainda que, além de fatores como velocidade, temperatura e umidade do ar, a direção do fluxo de ar é importante na distribuição de calor e umidade, influenciando a eficiência e a uniformidade da secagem. Esses resultados, destacam a importância de ajustes no processo de secagem para melhorar a qualidade e reduzir os impactos dos custos operacionais elevados

Palavras-chave: calor; difusão líquida; massa; simulação numérica; transferência

[1] Estudante do Doutorado em Engenharia de Processos - Centro de Ciência e Tecnologia - UFCG
[2] Docente Departamento de Engenharia de Biotecnologia, Centro de Desenvolvimento Sustentável do Semiárido, Universidade Federal de Campina Grande
[3] Docente do Departamento de Engenharia Mecânica, Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande

1. INTRODUÇÃO

A indústria da construção civil desempenha um papel fundamental na economia global, contribuindo significativamente para o Produto Interno Bruto (PIB) de diversas nações (Lima *et al.,* 2020). No Brasil, esse setor, representa cerca de 3,9% do PIB, configurando-se como um elemento estratégico para o desenvolvimento econômico e social (Araújo *et al.,* 2022). Dentre os materiais amplamente utilizados na construção civil, os tijolos cerâmicos, se destacam por suas propriedades como durabilidade, baixo custo e adequação às exigências físicas e mecânicas, que são largamente empregados em obras residenciais, comerciais e industriais (Oliveira *et al.,* 2023). Nesse cenário, o processo de fabricação de tijolos é composto por várias etapas, constituídas por coleta, mistura, moldagem, secagem e queima, sendo a secagem uma fase particularmente importante, por apresentar maior suscetibilidade a falhas que podem comprometer a qualidade final do produto (Mutsuddy; Ford, 1994; Verduch; Garcia, 1979). Nos últimos anos, desafios econômicos e ambientais têm impactado a indústria ceramista. A pandemia de Covid-19 intensificou problemas como a escassez de matéria-prima e o aumento dos custos de energia, dificultando a competitividade das empresas (Sperandio *et al.,* 2021).

Além disso, a seca histórica enfrentada pelo Brasil agravou a crise energética, dificultando a produção. Diante desse cenário, é essencial adotar métodos que promovam maior eficiência nos processos produtivos e reduzam perdas (Santos; Oliveira; Mendes, 2023). A Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) destaca-se como uma ferramenta tecnológica promissora para a modelagem e simulação de processos industriais. Através da CFD, é possível analisar com precisão fenômenos como a transferência de calor e massa, otimizando condições de operação de forma controlada (Szpicer *et al*., 2023). Essa abordagem já tem sido amplamente utilizada em setores como o automotivo, aeronáutico e alimentício, demonstrando seu potencial para reduzir o consumo energético e melhorar a eficiência de processos.

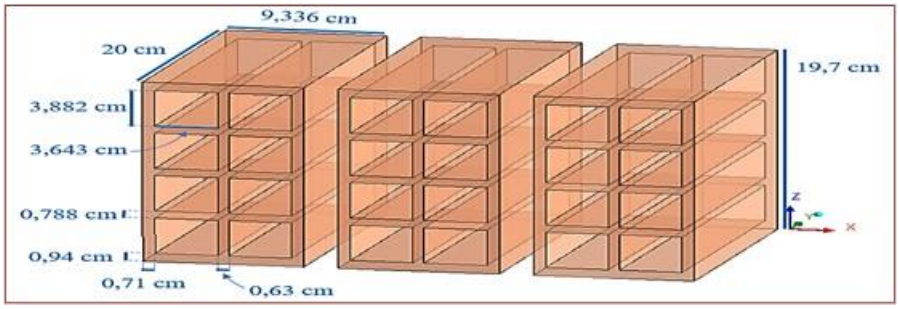
No contexto da secagem industrial, que emprega secadores convectivos, estudos indicam que a eficiência desses equipamentos está diretamente relacionada a parâmetros como velocidade do ar, temperatura, umidade relativa e uniformidade do fluxo (Chandramohan, 2016; Tzempelikos *et al.,* 2015).A aplicação da CFD no processo de secagem de tijolos cerâmicos argilosos apresenta uma oportunidade relevante para a indústria ceramista. Essa tecnologia pode ser empregada para aprimorar a eficiência dos secadores existentes, minimizar perdas durante a secagem e garantir que os produtos atendam às normativas de qualidade estabelecidas, como a ABNT NBR 15270 e a Portaria nº 558/2013 do INMETRO (Brasil, 2013). Com base nessa perspectiva, o presente trabalho propõe o estudo da transferência de calor e massa na operação de secagem de três tijolos cerâmicos vazados dispostos em série, utilizando a dinâmica dos fluidos computacional (CFD). O objetivo é contribuir para a competitividade da indústria ceramista, promovendo processos produtivos mais eficientes, alinhados às demandas econômicas e ambientais atuais.

2. MATERIAL E MÉTODOS

O estudo é de natureza experimental e utiliza modelagem computacional para analisar a distribuição de umidade, temperatura durante o processo de secagem de tijolos cerâmicos. A partir disso, foram inseridos na simulação computacional uma estufa com três tijolos cerâmicos em seu interior dispostos paralelamente ao fluxo de ar. As dimensões e espaçamentos dos tijolos foram padronizados para garantir

reprodutibilidade do experimento. Foi realizada configuração experimental com temperatura testada a 80°C; o tempo de secagem foi analisado aos 10 minutos e aos 300 minutos. A velocidade do ar de secagem foi de 0,08 m/s. Quanto aos procedimentos de análise, foi utilizada uma abordagem de simulação computacional que integrou o meio fluido (ar da estufa) e o meio sólido (tijolos cerâmicos). As simulações computacionais permitiram a obtenção de mapas de distribuição de temperatura e umidade na superfície e no interior dos tijolos. Os gráficos foram gerados para representar as curvas de comportamento aos 10 minutos e aos 300 minutos, analisando as diferenças entre as condições testadas. Na Figura 1, mostra a geometria respresentativa dos tijolos de cerâmica.

Figura 1 - Geometria representativa dos tijolos cerâmicos.

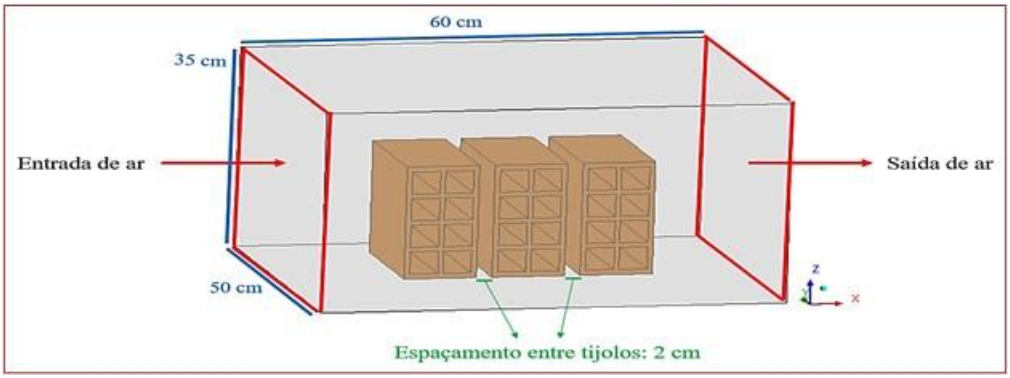


Fonte: autoria própria (2023).

A estufa é ilustrada na Figura 2, bem como suas dimensões. A área de entrada de ar foi reduzida devido às limitações computacionais, pois quanto maior o domínio, maior é a quantidade de elementos necessários para ter uma malha de boa qualidade, e maior será o custo computacional para se alcançar resultados satisfatórios da simulação numérica. A Figura 2, revela a geometria representativa da estufa com tijolos de cerâmica.

Para que as equações que governam o fenômeno possam ser resolvidas computacionalmente, necessita-se da transformação de um domínio contínuo para um domínio discreto. Tal transformação é feita pela criação da malha numérica e, neste caso, construiu-se uma malha hexaédrica sobre os domínios.

Figura 2 - Geometria representativa da estufa com tijolos cerâmicos.

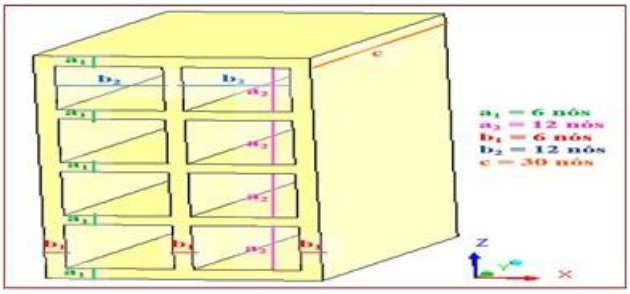


Fonte: autoria própria (2023).

Na construção desse tipo de malha, define-se o número de nós de cada aresta conforme Figura 3. Acrescentou-se em cada tijolo o refinamento, conforme descrito na

Figura 4, que equivale ao refinamento da melhor malha obtida no teste de malha de Araújo (2019).

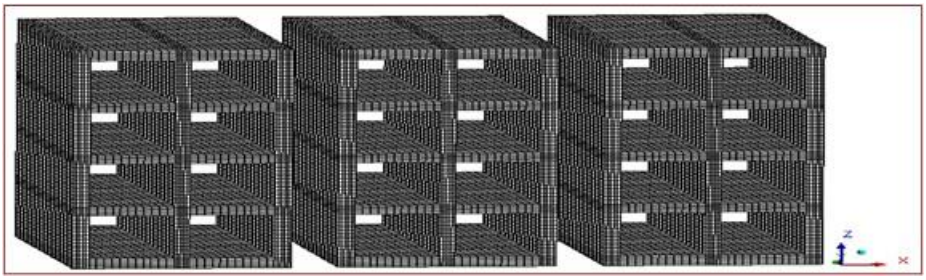
Figura 3 - Número de nós totais do tijolo.



Fonte: autoria própria (2023).

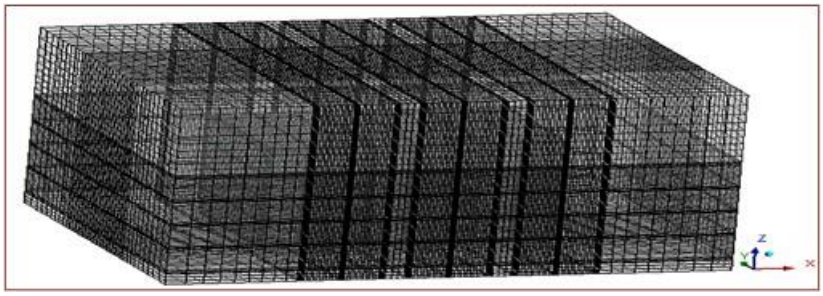
Deste modo, cada tijolo (domínio sólido) contém 45.965 elementos hexaédricos e 55.800 nós conforme Figura 4. Relativo à estufa (domínio fluido), contém 376.050 elementos e 426.432 nós conforme Figura 5. Em suma, considerando-se ambos os domínios, têm-se um total de 513.945 elementos e 593.832 nós.

Figura 4- Malha hexaédrica gerada sobre os tijolos



Fonte: autoria própria (2023).

Figura 5- Malha numérica sobre o domínio da estufa com tijolos.



Fonte: autoria própria (2023).

Neste estudo, a secagem de tijolos cerâmicos industriais (tijolos de 8 furos) foi descrita em várias condições operacionais, utilizando modelagem matemática, com base nas pesquisas de Silva (2009) e Araújo (2019). A fase sólida é constituída pelos tijolos cerâmicos e abaixo estão as equações que governam o fenômeno físico na modelagem matemática.

A equação da transferência de calor na fase sólida é descrita pela equação:

$$\frac{\partial(\rho_S H_S)}{\partial t} = \nabla.(\lambda_S \nabla T_S) \quad (1)$$

Em que ρ_s é a massa específica, H_S é a entalpia, t é o tempo, λ_S é a condutividade térmica e T_s é a temperatura. Para a equação da transferência de massa (variável adicional), a umidade é inserida no sólido através de uma variável adicional, no formato de massa de água [g]. Assim, a equação da transferência de massa dentro do domínio sólido é descrita pela equação:

$$\frac{\partial m}{\partial t} - \nabla.(D_m \nabla m) = 0 \quad (2)$$

Em que m é a massa de água dentro do material e D_m é coeficiente de difusão mássico. A fase fluida é constituída pela estufa e abaixo estão as equações que governam o fenômeno físico na modelagem matemática. A transferência de calor na fase fluida é descrita pela equação abaixo. Destaca-se que o aquecimento interno devido ao atrito e o termo fonte foram desconsiderados. Assim a equação da transferência de calor será:

$$\frac{\partial(\rho_F H_F)}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\rho_F \vec{U} h_F\right) = \nabla \cdot (\lambda_F \nabla T_F) \quad (3)$$

Em que λ_F é a condutividade térmica, H_F é a entalpia e T_F é a temperatura do ar. A variável adicional circula pelo ar de acordo com a seguinte equação de transporte de massa:

$$\frac{\partial m}{\partial t} + \nabla.\left(m\vec{U}\right) = \nabla.(D_F \Delta m) \quad (4)$$

Equação da transferência de massa (ar): $\frac{\partial \rho_F}{\partial t} + \nabla.\left(\rho_F \vec{U}\right) = 0$ (5)

Em que ρ_F é a massa específica do ar e $\vec{U}$ é a velocidade do ar dentro da estufa.

Equação do momento linear:

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\rho_F \vec{U}\right) = -\nabla.\left(\rho_F \vec{U}\vec{U}\right) - \nabla p + \nabla\left\{\mu_{eff}\left[\nabla\vec{U} + \left(\nabla\vec{U}\right)^T\right]\right\} + \vec{S}_M \quad (6)$$

Em que ∇p é o gradiente de pressão, μ_{eff} é a viscosidade dinâmica e $\vec{S}_M$ é o termo fonte do momento linear. Utilizou-se o modelo de turbulência k-ε, que foi adotado por Araújo (2019) por ser considerado como um modelo padrão na indústria. No modelo, a viscosidade do fluido é dada por:

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t \quad (7)$$

Em que a viscosidade turbulenta (μ_t) é definida por:

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{\kappa^2}{\varepsilon} \quad (8)$$

Onde C_μ é uma constante (= 0,09), k e ε representam respectivamente a energia cinética turbulenta e a taxa de dissipação de energia. Na interface entre a fase sólida e a fase líquida, a massa de água, utiliza-se na modelagem matemática, a condição de fluxo conservativo na interface (*conservative interface flux*) que foi adotada para que a variável adicional (massa de água) atravessasse os domínios sem haver perdas. Araújo (2019)

explica que quando se trata de um domínio sólido e um fluido, isto significa dizer que a variável que se difunde pelo sólido via difusão atravessa a interface e se difunde pelo fluido via convecção, caracterizando uma condição de contorno de terceira ordem. Seja o fluxo difusivo da massa de água na camada limite sobre o tijolo igual ao fluxo conservativo da massa de água no ar, a equação que descreve o fluxo conservativo é:

$$-D_{agua-ar}\nabla m_{\text{interface}} = h_m\left(m_{\text{interface}} - m_{\text{eq-interface}}\right) \quad (9)$$

Em que $D_{agua\text{-}ar}$ é a difusividade da massa de água no ar (é inicialmente estabelecida), $m_{interface}$ é massa de água instantânea na interface, $m_{eq\text{-}interface}$ é a massa de água na interface na condição de equilíbrio e h_m é o coeficiente de transferência de massa convectivo. Em termos de temperatura, a transferência de calor também segue a condição de interface, no qual o fluxo convectivo de calor é igual ao fluxo difusivo de calor na superfície:

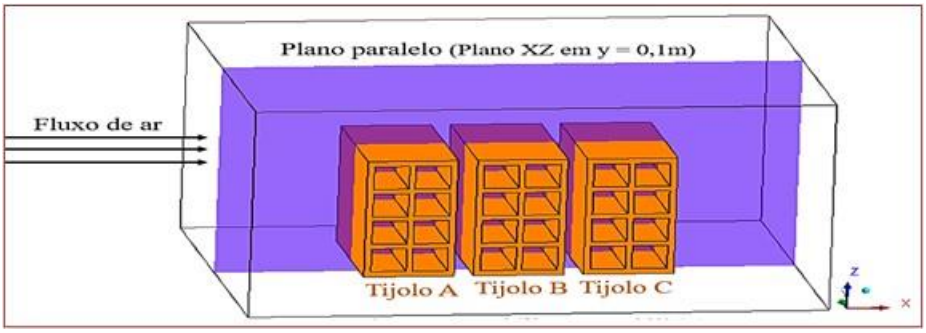
$$-\lambda_{ar}\nabla T_{\text{interface}} = h_C\left(T_{\text{eq-interface}} - T_{\text{interface}}\right) \quad (10)$$

Em que λ_{ar} é condutividade térmica do ar, $T_{interface}$ é a temperatura instantânea na interface, $T_{eq\text{-}interface}$ é a temperatura de equilíbrio e h_C é o coeficiente de transferência de calor convectiva.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

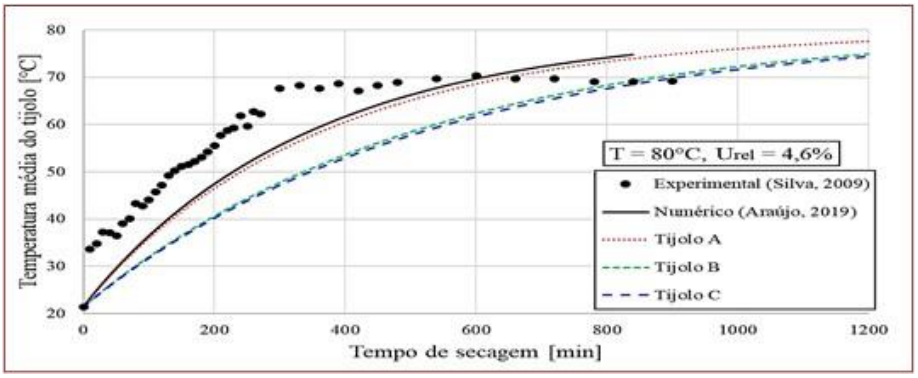
Conforme citado anteriormente, a secagem foi analisada à temperatura de 80°C. Com isto, observou-se que a distribuição de umidade na superfície dos tijolos aos 10 minutos apresentou um gradiente inicial de ΔMmáx=0,058 g/g b.s. Aos 300 minutos, o gradiente de ΔMmáx reduziu para 0,028 g/g b.s., indicando uma substancial redução durante o processo. Com relação à distribuição de umidade no interior dos tijolos, a secagem interna apresentou menor gradiente de umidade comparado à superfície, com ΔMmáx=0,032 g/g b.s. após 300 minutos e próximo ao gradiente máximo observado na superfície. A uniformidade na secagem sugere que 80°C foi eficaz para evitar gradientes excessivos, reduzindo o risco de tensões internas que poderiam causar fissuras nos tijolos.

Figura 6 - Plano para obtenção dos campos de temperatura, velocidade e massa de água.



Fonte: autoria própria (2023).

Figura 7 - Temperatura média dos tijolos durante o processo de secagem (T = 80°C).



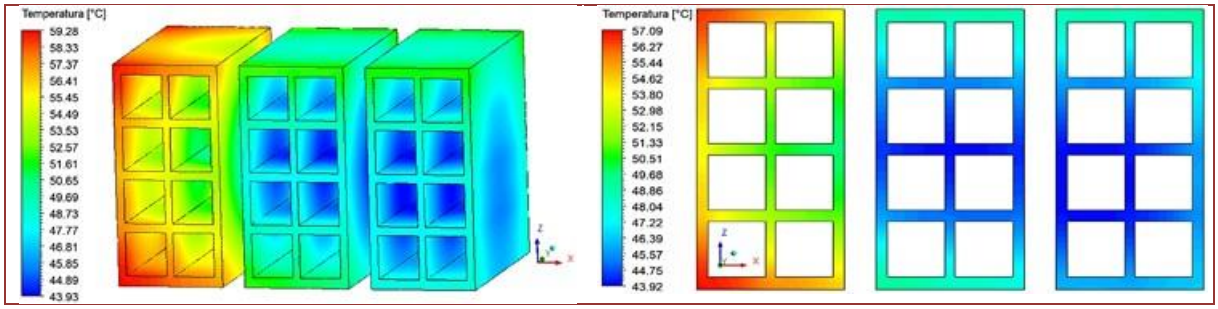
Fonte: autoria própria (2023).

Na Figura 7 observa-se que a curva de aquecimento do tijolo isolado (Araújo, 2019) encontra-se acima das demais curvas, e isto ocorre porque o ar de secagem dentro da estufa transmite seu calor para apenas uma amostra. Assim, por óbvio, ela se aquece mais rapidamente. Ao adicionar mais dois tijolos, observa-se o rebaixamento das curvas de aquecimento. Um comportamento interessante a se notar trata-se da curva do Tijolo A, que por ser o primeiro a ter contato com o fluxo do ar de secagem, apresenta uma cinética de aquecimento maior em comparação com os Tijolos B e C pelo fato do Tijolo A estar mais exposto em termos de área, o dobro da área de exposição do Tijolo B ou Tijolo C, recebendo o fluxo de ar de secagem, mas ainda assim abaixo da curva do tijolo isolado. Outro fato também interessante é que as curvas dos Tijolos B e C são bastante próximas, quase sobrepostas. À medida que se eleva a temperatura do ar de secagem, as curvas dos Tijolos B e C se aproximam cada vez mais, a ponto de considerar que na secagem à 80°C ambos os tijolos apresentam a mesma cinética de aquecimento. Percebe-se que a curva de temperatura numérica de Araújo (2019) aparenta não ter boa aderência à curva de temperatura experimental de Silva (2009). Nota-se, também, que a curva numérica ora apresenta valores abaixo da curva experimental e ora acima da mesma.

Explica-se o fenômeno pelo fato de Araújo (2019) ter utilizado no domínio sólido propriedades termofísicas constantes e não ter considerado a energia necessária para evaporar a água do tijolo, cuja qual, não é prevista no modelo de difusão líquida. Tal premissa também foi utilizada na pesquisa deste trabalho.

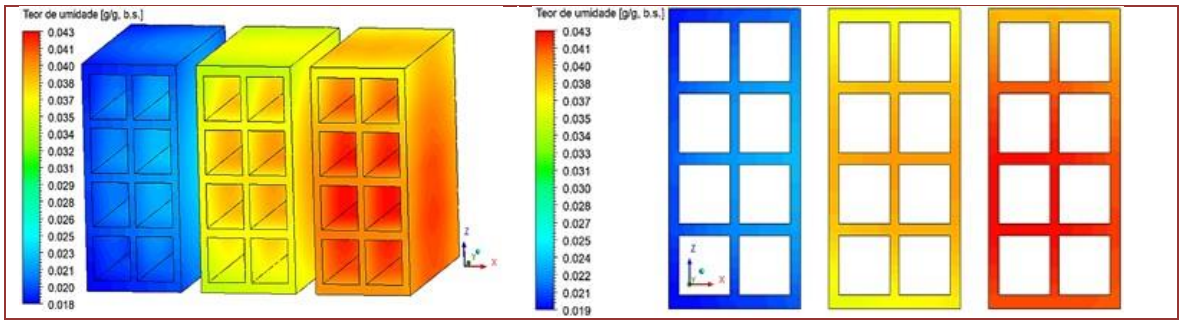
O comportamento do fluxo do ar manteve-se adequado para garantir a remoção contínua da umidade, mesmo em áreas com menor incidência direta de ventilação. Observa-se que a temperatura de 80°C mostrou-se um ponto de equilíbrio entre eficiência de secagem e minimização de riscos de defeitos nos tijolos. A uniformidade observada, tanto na superfície quanto no interior dos tijolos, sugere que esta temperatura é adequada para processos que buscam evitar tensões internas causadas por gradientes extremos. As Figuras 8 e 9 mostram os termogramas da temperatura e da umidade na superfície e no interior dos tijolos.

Figura 8 – Termograma da temperatura na superfície e no interior tijolo.



Na Figura 8, observa-se que a temperatura de 80°C é destacada como uma temperatura adequada, proporcionando uma boa eficiência de secagem enquanto minimiza o risco de defeitos no material. A uniformidade observada sugere que, com essa temperatura, o processo de secagem ocorre de forma controlada, evitando tensões internas nos tijolos que poderiam ser causadas por gradientes térmicos excessivos entre a superfície e o interior do tijolo. Isso é fundamental para garantir a qualidade do produto final e evitar rachaduras ou deformações.

Figura 9 – Termograma de umidade na superfície e no interior do tijolo



A Figura 9, mostra os níveis de umidade tanto na superfície quanto no interior dos tijolos. É possível que a remoção da umidade seja eficaz em todas as partes do tijolo, mesmo nas áreas com menor incidência direta de ventilação, conforme observado no texto. A uniformidade da umidade entre a superfície e o interior do tijolo sugere que a

temperatura de 80°C, também tem um papel importante na remoção contínua da umidade, garantindo que o processo de secagem seja eficiente e que o tijolo não retenha umidade excessiva, o que poderia comprometer suas propriedades físicas e mecânicas.

4. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos para a temperatura de 80°C evidenciam que este parâmetro se apresenta como uma opção eficiente e equilibrada para o processo de secagem de tijolos. Observou-se uma uniformidade significativa na distribuição da umidade, tanto na superfície quanto no interior dos tijolos, ao longo do tempo. Essa característica minimiza o risco de defeitos estruturais, como fissuras, que são comuns em processos de secagem com gradientes extremos de umidade e temperatura. Adicionalmente, a estabilidade térmica e o comportamento adequado do fluxo de ar demonstraram que a secagem à temperatura de 80°C favorece uma remoção contínua de umidade sem formação de bolsões de ar saturado, otimizando o processo em termos de eficiência e qualidade final do produto.

REFERÊNCIAS

[1] ARAÚJO, M. V. Simulação numérica via CFD da secagem de tijolos cerâmicos industriais. 2019. 242f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2019. Disponível em: http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/xmlui/handle/riufcg/12639. Acesso em : Agosto de 2023.

[2] ARAÚJO, M.V. *et al*. Computational Fluid Dynamics Studies in the Drying of Industrial Clay Brick: The Effect of the Airflow Direction. Diffusion Foundations and Materials Applications, v. 30, p. 69-84, 2022. Disponível em: https://www.scientific.net/DFMA.30.69. Acesso em: Agosto de 2023.

[3] LIMA, P. et al. Estudo da transferência de calor e massa em sólidos porosos aplicados à secagem de tijolos cerâmicos industriais usando análise concentrada. Research, Society and Development, v. 9, n. 12, e48391211391, 2020. DOI: 10.33448/rsd-v9i12.11391.Disponível em: http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v9i12.11391. Acesso em: 22 mar. 2024.

[4] MUTSUDDY, Beebhas C.; FORD, Renee G. Ceramic injection molding. Springer Science & Business Media, 1994. Disponível em: https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=7_N11G5sAVkC&oi=fnd&pg=PR7&dq=MUTSUDDY,+Beebhas+C.%3B+FORD,+Renee+G.+Ceramic+injection+molding.+Springer+Science+%26+Business+Media,+1994.&ots=_UYbbPkakx&sig=8OTv4aA5hyL1MCqp_66jWs_-z1w#v=onepage&q=MUTSUDDY%2C%20Beebhas%20C.%3B%20FORD%2C%20Renee%20G.%20Ceramic%20injection%20molding.%20Springer%20Science%20%26%20Business%20Media%2C%201994.&f=false. Acesso em: 25 mar. 2024.

[5] OLIVEIRA, M. T. et al. Caracterização de tijolos cerâmicos estruturais: propriedades físicas e mecânicas. Cerâmica, v. 69, n. 402, p. 300-310, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.1590/0366-691320236942832. Acesso em: 25 mar. 2024.

[6] SZPICER, Arkadiusz et al. Application of computational fluid dynamics simulations in food industry. European Food Research and Technology, v. 249, n. 6, p. 1411-1430, 2023. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1007/s00217-023-04231-y. Acesso em: 25 mar. 2024.

[7] SPERANDIO, Kastelli Pacheco et al. Análise dos principais problemas da construção civil durante a pandemia do coronavirus no brasil. Anais da Noite Acadêmica do Centro Universitário UNIFACIG, v. 1, 2021. Disponível em: https://pensaracademico.unifacig.edu.br/index.php/noiteacademica/article/view/2717 Acesso em: 25 de agosto de 2023.

[8] VERDUCH, GARCIA. Drying behaviour of clay bodies. CERAMURGIA Ceramurgia, v. 9, n. 2, p. 65, 1979.

Capítulo 3

Aspectos da biotecnologia microbiana na produção de energia térmica

Sandra Maijane Soares de Belchior[1]
Mario Eduardo Rangel Moreira Cavalcanti Mata

Resumo: Os métodos biotecnológicos aplicáveis à melhoria de culturas de microrganismos englobam preponderantemente os bioprocessos fermentativos, que se revelam como potencial abordagem biotecnológica. Nesse cenário, há a produção de calor, intrinsicamente ligada à decomposição de compostos orgânicos. Portanto, o objetivo deste estudo é investigar como os processos biotecnológicos que envolvem microrganismos podem ser utilizados na geração de energia térmica. Para isso, o estudo configura-se a partir de pesquisa bibliográfica, na qual se delineia de fontes bibliográficas constantes em bases destinadas à livre pesquisa e à consultas, tais como importante periódicos indexados. As fontes selecionadas na análise foram publicadas nos últimos 10 anos, levando-se em conta os textos provenientes de órgãos e instituições relevantes para o tema, podem superar esse lapso temporal. A aplicação de microrganismos na recuperação de ambientes contaminados, que visam minimizar ou eliminar poluentes contaminantes, ferramenta denominada biorremediação. Alinhadas às coleções de componentes biológicos padronizados e reutilizáveis, têm grande potencial para a criação de dispositivos que realizem funções vitais complexas e previsíveis. Contudo, os atuais dispositivos de biologia sintética visam corroborar com os mecanismos metabólicos de microrganismos. Assim, conclui-se que a utilização de microrganismos na biotecnologia se mostra um campo frutífero e promissor, com grandes possibilidades de avanço em diversas áreas da sociedade.

Palavras–chave: processos; meio ambiente; agroindústria; resíduos; reaproveitamento.

[1] Estudante do Curso de Doutorado em Engenharia de Processos - CCT – UFCG; Mestre em Sistemas Agroindustriais – CCTA – UFCG; Graduação em Direito – UniFIC; Graduação em Ciências Econômicas. – FFM

1. INTRODUÇÃO

A biotecnologia é um assunto que abrange o passado, o presente e o futuro. Trata-se da habilidade de alterar processos biológicos, promovendo avanços significativos no entendimento e desenvolvimento. Essa ciência aplicada integra saberes das ciências fundamentais para desenvolver soluções biológicas em várias esferas da vida. Assim, é essencial unir conhecimentos, operando de maneira multidisciplinar (Goettert *et al.*, 2021).

Possui abrangência em diversas áreas do conhecimento, como Biologia, Química e Engenharia. Com a passagem do tempo, diversas definições surgiram para esse setor, mas a sua rápida evolução faz com que esses conceitos se tornem frequentemente ultrapassados. Trata-se de uma prática que integra conhecimentos de diferentes disciplinas e utiliza organismos vivos para desenvolver produtos benéficos ou resolver problemas. Assim, é possível observar que a Biotecnologia tem um impacto direto na vida das pessoas, oferecendo benefícios em vários segmentos, incluindo saúde, agricultura, indústria e meio ambiente. Sendo assim visa a criação de produtos e processos biológicos por meio de tecnologia. O ensino dessa área procura promover a formação de uma base técnica e científica na comunidade, incentivando o avanço de diversas disciplinas, (Goettert *et al.*, 2021).

Atualmente a biotecnologia corresponde as ferramentas de grande importância para propiciar a deferentes setores da sociedade. No campo da agropecuária, ações de pesquisa e desenvolvimento na área da biotecnologia são fundamentais para o desenvolvimento de sistemas mais produtivos e sustentáveis. A biotecnologia envolve várias áreas do conhecimento e em decorrência vários profissionais, sendo uma ciência da natureza multidisciplinar (Faleiro; Andrade; Reis Junior, 2011).

De acordo com a Convenção sobre a Diversidade Biológica, o termo “biotecnologia” é definido como qualquer aplicação tecnológica que use sistemas biológicos, organismos vivos ou derivados destes, para obter ou modificar produtos e processos para uso específico, sendo esta a definição oficial reconhecida pela Organização das Nações Unidas para a Agricultura e Alimentação (Buriti *et al.*, 2021).

Os processos biotecnológicos que passam a ser aplicáveis para a melhoria de culturas de microrganismos incluem os bioprocessos fermentativos destacando-se como a principal biotecnológica. Dentro deste contexto, possui o contexto da produção de calor, que por sua vez se relaciona com a deterioração dos compostos orgânicos (Buriti *et al.*, 2021).

A biotecnologia se introduz dentro do ramo da biologia em constante transformação, trata-se de uma área interdisciplinar fortemente ligada a pesquisa cientifica e tecnológica que tem como principal objetivo desenvolver processos e produtos utilizando agentes biológicos. Ate recentemente pouco se falava em manipular seres vivos, microrganismos devido as limitações de sua espécie. Hoje já é possível desenvolver e atribuir características especificas aos organismos sem prejudicá-los (Danelon, 2019).

Com o avanço da ciência, a biotecnologia agrícola se intensificou a partir da década de 70, dando início a Revolução Verde, que trata-se da aplicação de um conjunto de biotécnicas modernas no campo permitiu aumentar a produção agrícola (Silva; Macagnan; Cardoso, 2021).

Neste contexto a biotecnologia microbiana possibilita soluções para desafios complexos no campo da preservação ambiental. A microbiologia é o ramo da ciência dedicado à análise dos microrganismos, organismos de dimensões minúsculas que não são visíveis sem ajuda de instrumentos ópticos. Esses seres podem ser unicelulares ou multicelulares e estão presentes em diversos habitats, incluindo ambientes aquáticos, atmosféricos, terrestres e no interior de seres vivos (Fonseca *et al.*, 2023; Goettert *et al.*, 2021).

A partir da investigação da biodiversidade microbiológica, é possível averiguar a possibilidade de obtenção de microrganismos produtores de enzimas que podem ser empregadas em grande numero de processos biotecnológicos, como por exemplo, a clivagem das cadeias de carbono da celulose, capacidade de gerar energia a partir de processos de óxido-redução de minérios, síntese de hidrogênio, produção de metano derivado de material orgânico e a conversão desse gás a metanol (Romano *et al*., 2016).

Entretanto, embora as capacidades naturais de alguns microrganismos já serem notáveis, as ferramentas oferecidas pela biologia molecular, como por exemplo, estudos do genoma de bactérias e fungos e a ativação genética para melhoria das capacidades dos produtores, a replicação dos genótipos desejados em outros organismos, entre outras possibilidades envolvendo o DNA replicante, podendo otimizar os resultados desejados, removendo a limitação do processo e aumentando o rendimento do produto (Romano *et al*., 2016).

A utilização de biogás é uma prática já consolidada e pode ser aproveitada para a produção de energia. A matéria orgânica que se transforma em metano é armazenada, conferindo ao gás uma energia que possui grande potencial de uso. As Archaeas que desempenham um papel na produção de metano são conhecidas como metanogênicas. Vale destacar que o metanol, na forma líquida, é mais facilmente transportável do que o metano, que se apresenta como gás, e o metanol atua como um produto intermediário na conversão do metano em dióxido de carbono. Um organismo mutante pode ter seu material genético alterado para interromper o processo na etapa de geração de metanol produto (Romano *et al*., 2016).

A energia pode ser gerada a partir de minerais. Algumas bactérias, como Thiobacillus ferrooxidans, que capturam enxofre durante a produção de carvão, extraem energia por meio da oxidação de metais e da liberação de ácidos sulfúricos solúveis (H2SO4). Existem também bactérias que conseguem realizar esse processo com diferentes tipos de minérios, incluindo o ferro produto (Romano *et al*., 2016).

A biologia sintética se apresenta como um campo emergente e multidisciplinar que integra princípios de engenharia, como a modularização, para o desenvolvimento e modificação de circuitos genéticos. Um dos propósitos da biologia sintética é facilitar a engenharia biológica por meio da caracterização e padronização de partes biológicas, o que reduz o tempo necessário para a construção genética, aumentando sua confiabilidade e previsibilidade (Fávaro, 2012)

Neste sentido o objetivo deste trabalho, trata-se de analisar como o processo biotecnológico envolvendo microrganismo pode ser utilizado com a finalidade de produção de energia térmica.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Diante do contexto a ser realizado no trabalho, o projeto passa a ser uma pesquisa bibliográfica, onde se busca materiais bibliográficos, como por exemplo, artigos, livros, entre outros, dos quais se encontram em base de dados voltados a divulgação de dados para o público em geral.

A pesquisa bibliográfica é uma competência essencial nos cursos de graduação, pois representa o ponto de partida para todas as práticas acadêmicas. Tanto as investigações em laboratório quanto as de campo requerem, obrigatoriamente, uma pesquisa bibliográfica inicial. Atividades como seminários, painéis, debates, resumos críticos e monografias também demandam essa pesquisa. Ela se torna indispensável em estudos exploratórios, na definição do tema de um projeto ou pesquisa, no desenvolvimento do conteúdo, nas citações e na apresentação das conclusões. Assim, embora não todos os alunos realizem pesquisas de laboratório ou de campo, é inegável que todos, sem exceção, precisarão conduzir pesquisas bibliográficas para a elaboração dos diversos trabalhos requisitados (Andrade, 2010).

O estudo se fundamenta na análise de teorias previamente publicadas, tornando essencial que o pesquisador adquira uma compreensão aprofundada dos textos e organize todo o conteúdo em exame. Ao conduzir uma pesquisa bibliográfica, é necessário que o pesquisador leia, reflita e elabore suas considerações sobre o que foi estudado, investindo tempo na investigação para reestruturar a teoria e enriquecer os conceitos teóricos (Sousa; Oliveira; Alves, 2021).

A pesquisa bibliográfica consiste na coleta ou revisão de materiais já publicados relacionados à teoria que orientará a investigação científica. Esse processo requer empenho, estudo e avaliação por parte do pesquisador responsável. O objetivo é compilar e examinar textos previamente divulgados, a fim de fundamentar a pesquisa científica (Sousa; Oliveira; Alves, 2021).

Este tipo de pesquisa é amplamente utilizado em diversas atividades acadêmico-científicas, pois permite ao pesquisador acessar o conhecimento previamente gerado a respeito de um tema específico. Além disso, existem investigações científicas que se baseiam unicamente na pesquisa bibliográfica, recorrendo às obras teóricas já existentes para obter as informações essenciais que visam responder às questões levantadas pela análise em curso (Brito; Oliveira; Silva, 2021).

A pesquisa bibliográfica pode ser definida como a análise da literatura referente às principais teorias que fundamentam a produção científica. O levantamento bibliográfico pode ser feito em livros, periódicos, artigos de jornais, sites da internet, entre outras fontes (Pizzani *et al*. 2012). Esse tipo de pesquisa coloca o investigador em contato direto com toda a produção escrita relacionada ao tema em questão. É crucial que o pesquisador avalie a veracidade das informações coletadas, prestando atenção às possíveis incoerências ou contradições presentes nas obras consultadas (Prodanov e Freitas, 2013).

As bases de dados são entendidas como repositórios de informações que reúnem artigos e estudos acadêmicos desenvolvidos por instituições especializadas em diferentes campos do conhecimento. Essas investigações são frequentemente realizadas por meio dos motores de busca da Internet. É fundamental ressaltar que as bases de dados precisam apresentar uma sólida credibilidade científica (Pizzani *et al*. 2012).

Os materiais analisados foram considerados para a pesquisa, com o critério de tempo de 10 anos de publicação, atentando ao fato de produções textuais provenientes de

órgãos e instituições aos quais possuem relativa predominância na temática porem suas publicações excedem o período estimado para a pesquisa.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. BIOTECNOLOGIA

A Biotecnologia, que pode ser entendida como a integração entre biologia e tecnologia, consiste em um conjunto de métodos que aproveita organismos vivos ou suas partes para criar processos e produtos com valor econômico e/ou social. Essa disciplina abrange diferentes campos do conhecimento e, por isso, conta com a participação de diversos profissionais, caracterizando-se como uma ciência de abordagem multidisciplinar (Ceará, 2014)

O conceito de biotecnologia evoca a ideia de novidade e inovação, embora essas noções sejam influenciadas pelo contexto temporal. Para ilustrar, a produção de bebidas fermentadas, como a cerveja, remonta a séculos e, claramente, a cerveja é o resultado de um processo biotecnológico, embora não seja reconhecida dessa forma. Assim como outras tecnologias, a biotecnologia reflete as inovações contemporâneas (Ramos; Melo; Silva, 2016)

A expressão biotecnologia foi empregada pela primeira vez no começo do século XX. Embora a palavra seja recente, o princípio subjacente é bastante antigo. Se considerarmos seu significado abrangente, podemos afirmar que a biotecnologia teve início com a prática da agricultura ou pecuária, ou seja, com a habilidade humana de cultivar plantas e criar animais para atender às suas necessidades (Faleiro; Andrade, 2011)

Diversas abordagens associadas à biotecnologia têm proporcionado vantagens para a sociedade. Exemplos incluem fermentações industriais para fabricar vinhos, cervejas, pães, queijos e vinagres; a elaboração de medicamentos, vacinas, antibióticos e vitaminas; a aplicação de biofungicidas para o controle biológico de pragas e enfermidades; a utilização de microrganismos com o intuito de biodegradar resíduos e esgoto; a adoção de bactérias que fixam nitrogênio e fungos micorrízicos para aumentar a produtividade das plantas; além do aperfeiçoamento de plantas e animais por meio de métodos tradicionais de melhoramento genético e transformação genética (Ceará, 2014)

Uma definição abrangente de biotecnologia refere-se à utilização de organismos vivos ou de suas partes para fabricar produtos e proporcionar serviços. Dentro dessa concepção, podemos incluir tanto a biotecnologia tradicional quanto a contemporânea. A biotecnologia tradicional abriga um conjunto de práticas que a humanidade tem aperfeiçoado ao longo de milênios, como a produção de alimentos fermentados, incluindo pão e vinho. Por outro lado, a biotecnologia moderna compreende tecnologias relacionadas à engenharia genética, DNA recombinante, além de culturas de células e embriões voltadas para o desenvolvimento de novos produtos e processos. Dentre as diversas definições de biotecnologia, destacam-se aquelas mais amplas (Ceará, 2014)

A trajetória da Biotecnologia está intrinsecamente ligada à evolução da humanidade, inicialmente manifestando-se por meio da produção de alimentos. A elaboração de queijos, que remonta à Pré-História, utilizava a quimosina, uma enzima extraída do estômago de bezerros e ovelhas. Desde a antiguidade, itens como cerveja, vinho, vinagre, pão, iogurte, produtos derivados da soja e queijos têm sido parte da

alimentação humana, com evidências arqueológicas encontradas em diversas regiões, como Mesopotâmia, Egito, China e Europa Central. Outro exemplo notável da Biotecnologia histórica é a conservação de ração para animais, por meio da fermentação de gramíneas, que permitiu a criação de bovinos em climas mais frios por períodos prolongados (Silva; Macagnan; Cardoso, 2021)

Uma das definições que maior representa a biotecnologia trata-se:

> É o uso de células e biomoléculas para a resolução de problemas ou transformação em produtos. É um conjunto de técnicas que potencializa as melhores características das células, como as capacidades produtivas, e disponibiliza moléculas biológicas, como DNA e proteínas, para serem utilizadas (Agência Brasileira De Desenvolvimento Industrial, 2009).

De maneira geral, biotecnologia refere-se à aplicação da biologia com propósitos tecnológicos e comerciais. Isso envolve o uso de organismos vivos para desenvolver novos produtos, processos ou serviços, com o intuito de adicionar valor, gerar renda e promover o bem-estar da sociedade. Em um sentido mais restrito, conhecido como "biotecnologia moderna", abrange um conjunto de técnicas e processos que envolvem a manipulação de células, alterações moleculares ou micro-organismos, incluindo a transformação do DNA e a modificação controlada de sua expressão, visando à exploração comercial (Ramos; Melo; Silva, 2016)

A Biotecnologia é uma área do conhecimento que explora organismos vivos ou suas partes para desenvolver produtos ou processos. Essa disciplina se relaciona com questões contemporâneas e, por vezes, controversas, como a edição de embriões humanos, a clonagem para fins terapêuticos e a genética transgênica. Embora pareça uma ciência moderna, a Biotecnologia remonta às civilizações antigas, evidenciada pela produção de alimentos; por exemplo, os egípcios já produziam bebidas como vinho e cerveja, além de pães, utilizando microrganismos. Ao longo dos séculos, e especialmente com o avanço das técnicas moleculares e da engenharia genética, essa abordagem foi refinada e se expandiu para várias áreas, incluindo medicina, agricultura e setores industriais (Silva; Macagnan; Cardoso, 2021; Schürrle, 2020)

A Biotecnologia fez sua marca no setor industrial ao utilizar dejetos de aves e cães no tratamento de peles e couros até o começo do século XX. A Microbiologia é fundamental para a Biotecnologia, porém, somente com a invenção do microscópio no século XVII foi possível entender plenamente o papel dos microrganismos nos processos fermentativos que possibilitaram a produção de alimentos e bebidas desde os tempos antigos (Silva; Macagnan; Cardoso, 2021; Schürrle, 2020)

A biotecnologia desempenha um papel crucial na fabricação de diversos alimentos que consumimos diariamente. Ingredientes essenciais para a elaboração de pães, queijos, iogurtes e bolos, por exemplo, são produzidos em larga escala com a colaboração de bactérias, leveduras, fungos, algas e até de certos tipos de vírus. Há cerca de 4500 anos antes de Cristo, registros provenientes da civilização babilônica já apontavam o uso de leveduras na produção de pães e cervejas. Com o avanço da biotecnologia, novas aplicações surgiram além da mera produção. O emprego de microrganismos agora possibilita a fabricação de substâncias que intensificam sabores, acrescentam textura, cor e consistência, além de aumentar a presença de vitaminas nos alimentos (Ito, 2018)

As "fábricas" microbianas vêm despertando um interesse crescente nas indústrias de aromas, uma vez que elas oferecem uma alternativa sustentável para a obtenção de compostos de sabor e fragrância. Os polímeros gerados por bactérias, fungos e leveduras são conhecidos como biopolímeros microbianos, dentre os diversos tipos de polissacarídeos, os hidrocolóides se destacam por seu elevado valor comercial, resultado de sua habilidade em formar soluções viscosas e géis em ambientes aquosos, de forma análoga a outras gomas vegetais tradicionais. Vários estudos têm explorado como os hidrocolóides ou gomas influenciam as propriedades reológicas e a qualidade de biscoitos e bolos preparados com diferentes farinhas isentas de glúten, conhecidas como gluten-free (Lemões; Lemões; Mascarenhas, 2021; Kumar *et al.*, 2018)

A biotecnologia contemporânea é um campo emergente que o ser humano tem explorado para fins comerciais, abrangendo vários setores da economia, como saúde humana, saúde animal, agropecuária, meio ambiente, indústria e serviços. Fundamentada na aplicação do conhecimento para o desenvolvimento de produtos e processos, essa área avançou substancialmente com o entendimento dos processos biológicos fundamentais. Esse entendimento possibilita um controle ou manipulação aprimorada de organismos vivos, visando atingir metas específicas (Ramos; Melo; Silva, 2016)

A biotecnologia é uma área científica ampla, que abrange diversas disciplinas relacionadas à biologia. Por sua natureza, a biotecnologia é essencialmente multidisciplinar. Dessa forma, é comum encontrar profissionais como biólogos, médicos, agrônomos, engenheiros de alimentos, farmacêuticos e químicos, todos formados e integrados na cadeia produtiva da biotecnologia. O principal diferencial de um especialista em biotecnologia é sua capacidade de proporcionar uma perspectiva holística que une a pesquisa biológica à sua aplicação prática no mercado (Ramos; Melo; Silva, 2016)

A biotecnologia está cada vez mais presente na sociedade contemporânea, seja por sua aplicação na área da saúde, na produção de alimentos ou na preservação do meio ambiente, ou ainda pelas questões econômicas, éticas e sociais que surgem com suas utilizações. Existem diversos sites voltados para o ensino e disseminação da biotecnologia, oferecendo uma ampla gama de recursos educativos, como textos, reportagens que fomentam debates, diretrizes para a execução de experimentos laboratoriais, esquemas gráficos, quizzes, vídeos, glossários, animações e outros materiais. A apresentação do tema biotecnologia é de suma importância e se torna urgente diante das controvérsias discutidas na sociedade, que envolvem diversas aplicações dessa área (Ramos; Melo; Silva, 2016)

Exemplos de aplicações biotecnológicas incluem: a produção de insulina utilizando microrganismos, o desenvolvimento de medicamentos com efeitos colaterais reduzidos, a criação de plantas transgênicas que são mais resistentes a pragas e condições adversas como secas, salinidade e altas temperaturas, além de novos kits para diagnóstico de doenças, entre outros (Ramos; Melo; Silva, 2016)

A utilização da biotecnologia no campo ambiental se manifesta principalmente através da biodegradação, que se refere à decomposição de materiais ou compostos químicos por meio de processos biológicos. Além das inovações tecnológicas, os avanços da biotecnologia contemporânea têm possibilitado a criação de diversos tipos de marcadores moleculares, assim como métodos de análises genômicas e proteômicas, que têm aberto caminho para diversas aplicações práticas na pesquisa e desenvolvimento do setor agropecuário. A seguir, algumas das principais técnicas e produtos biotecnológicos

relacionados à agropecuária serão discutidos de forma resumida, com uma análise mais detalhada nos capítulos subsequentes deste livro (Faleiro; Andrade, 2011)

As táticas de manipulação molecular e metabólica resultaram em termos que, por muito tempo, estiveram em destaque, como “engenharia genética”, “terapia gênica” e “organismos transgênicos”. No entanto, esses termos atualmente estão menos em voga, enquanto novas expressões, como “clonagem”, “terapia celular” e “células-tronco”, emergem com mais proeminência na sociedade. Essas novas terminologias refletem as direções da biotecnologia em seus experimentos contemporâneos. Graças à aplicação de técnicas combinadas, tem-se conseguido desenvolver plantas que toleram melhor a falta de água, aumentando a produção em áreas cultivadas; criar culturas que são mais resistentes a pragas e doenças, reduzindo a necessidade de agrotóxicos e substâncias prejudiciais ao meio ambiente; elaborar abordagens terapêuticas mais eficazes para doenças humanas e inventar métodos para eliminar poluentes que antes eram desafiadores de remover do ambiente (Ramos; Melo; Silva, 2016)

De acordo com o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (BRASIL, 2010), estamos observando uma transformação significativa nas áreas de diagnóstico e tratamento de doenças. Isso inclui o desenvolvimento e a utilização de novos medicamentos tanto para humanos quanto para animais. Além disso, há avanços na multiplicação, produção e reprodução de diversas espécies de plantas e animais, bem como no controle de pragas e enfermidades que afetam tanto a fauna quanto a flora. Também se destacam os progressos na criação e aprimoramento de alimentos, na conservação e no uso sustentável da biodiversidade e dos biomas do país, assim como na gestão e valorização de resíduos, efluentes e subprodutos gerados pela indústria e agricultura. Outras inovações incluem a produção de energia renovável, menos poluente, recuperação de áreas degradadas, práticas de biorremediação, rastreabilidade, bioinformática, genômica e proteômica, entre outros campos, todos com um potencial crescente para inovações e criação de novos produtos e serviços. Essas áreas emergentes representam oportunidades valiosas para fomentar o desenvolvimento nacional fundamentado no conhecimento e na inovação, promovendo a geração de emprego e renda, o crescimento regional, o aumento da produção e das exportações de produtos com maior valor agregado, a diminuição das importações e a realização de uma produção limpa com menor impacto ambiental.

Atualmente, os principais desafios enfrentados incluem questões relacionadas ao aquecimento global, à dependência de combustíveis fósseis e à segurança alimentar e energética. A demanda crescente por energia da sociedade contemporânea tem sido majoritariamente suprida pelo uso de combustíveis fósseis, tais como gás natural, carvão, petróleo e seus derivados, como gasolina e diesel. Contudo, o aproveitamento dessas fontes de energia levanta preocupações acerca dos impactos ambientais provenientes da poluição do ar, da água e do solo, além da liberação de grandes quantidades de carbono do subsolo para a atmosfera sendo este um dos principais fatores que levam ao aquecimento global (Fivga *et al*. 2019; Hemansi *et al*. 2019).

Devido a esses fatores, diversos países têm demonstrado um crescente interesse no desenvolvimento de tecnologias inovadoras e na promoção de fontes de energia mais sustentáveis, com a intenção de substituir os combustíveis fósseis. Nesse cenário, os biocombustíveis se destacam como uma opção viável, utilizando a biomassa vegetal como matéria-prima para a produção de combustíveis como etanol e biodiesel (Fivga *et al*. 2019)

O Brasil se destaca nesse contexto por contar com uma significativa participação de fontes renováveis em sua matriz energética, possuindo usinas de bioenergia bem consolidadas e em constante crescimento, com ênfase na utilização de resíduos de culturas como a cana-de-açúcar e o milho. A matriz energética brasileira apresenta uma posição única e se sobressai em relação à proporção de fontes renováveis quando comparada aos países da OCDE – Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico – assim como em âmbito global. Em 2018, 45,3% da matriz energética era composta por fontes renováveis, com destaque para o etanol e o bagaço de cana-de-açúcar representam 38,4% das fontes renováveis que compõe a matriz energética brasileira (Losekann; Tavares; 2021, Brasil, 2019; Vidal, 2019;).

3.2. BIOTECNOLOGIA MICROBIANA

A microbiologia, sendo uma disciplina fundamental nas ciências biológicas, emprega e cria métodos para examinar os processos essenciais da vida. Através da pesquisa com microrganismos, os pesquisadores conseguiram entender de forma avançada os princípios químicos e físicos que sustentam a vida, uma vez que as células microbianas apresentam diversas semelhanças com as células de organismos com múltiplas células; na verdade, todas as células possuem muitas características em comum (CEARÁ, 2014)

A microbiologia, como uma área da biologia aplicada, aborda diversas questões práticas significativas nas áreas da medicina, agricultura e indústria. Por exemplo, muitas doenças que afetam plantas e animais são provocadas por microrganismos. Esses organismos desempenham funções cruciais, como a fertilização do solo e a sustentação da produção animal. Além disso, muitos processos industriais em larga escala, como a fabricação de antibióticos e proteínas humanas, dependem fortemente desses microrganismos. Dessa forma, tanto os aspectos nocivos quanto os benéficos dos microrganismos influenciam diretamente a vida cotidiana das pessoas (CEARÁ, 2014)

Os microrganismos ocupam posições fundamentais nas funções humanas e em todo o ecossistema terrestre. Apesar de serem as menores entidades vivas, coletivamente eles representam a maior quantidade de biomassa no planeta e desempenham diversas reações químicas essenciais para outros seres vivos. Sem a presença de microrganismos, a evolução de outras formas de vida não teria ocorrido, e atualmente sua manutenção não seria viável (CEARÁ, 2014)

Na microbiologia, a expressão morfologia diz respeito à estrutura celular. Existem diversas morfologias nos procariotos, sendo as mais frequentes definidas por termos que fazem parte do léxico fundamental dos microbiologistas. As bactérias possuem distintas configurações morfológicas e podem ser categorizadas como cocos (forma redonda), bacilos (forma alongada), espirilos (forma helicoidal) e víbrios (semelhante a uma vírgula), entre outras (CEARÁ, 2014)

Um significativo diferencial competitivo do Brasil no avanço da biotecnologia é sua rica biodiversidade. Com centenas de milhares de espécies de plantas, animais e micro-organismos já catalogados, a previsão é que esse total possa alcançar milhões. O país abriga cerca de 20% da biodiversidade global, que se encontra distribuída em seis biomas: Amazônia, cerrado, caatinga, mata Atlântica, pantanal e pampa, além das áreas costeiras e marinhas. A diversidade genética e molecular presente nesses biomas proporciona um vasto espaço para pesquisas e inovações no campo da biotecnologia. Ademais, a

distribuição única dessa biodiversidade gera oportunidades para o desenvolvimento econômico que valoriza as características regionais, promovendo arranjos produtivos sustentáveis fundamentados em aplicações biotecnológicas (AZEVEDO et al., 2018)

Diversos debates têm ocorrido com o objetivo principal de estabelecer uma política de conservação ambiental, tanto no Brasil quanto em outras partes do mundo, enfocando a necessidade de explorar os recursos naturais sem comprometer o equilíbrio dos ecossistemas em que todos os seres vivos coexistem. Essa discussão inclui o monitoramento, a proteção e a exploração de novas soluções tecnológicas que possam beneficiar a sociedade. No contexto da preservação ambiental em nações agrícolas como o Brasil, procura-se soluções para variados desafios, como a necessidade de aumentar a produção de alimentos utilizando insumos microbianos (micro-organismos ou substâncias geradas por eles), que não apenas promovem o crescimento das plantas, mas também oferecem proteção contra patógenos e pragas (AZEVEDO et al., 2018)

Dessa forma, a biotecnologia, especialmente a biotecnologia microbiana, pode desempenhar um papel fundamental na busca de soluções para os sérios problemas ambientais causados pelo desenvolvimento industrial acelerado, que resultam em contaminação do solo, água e aqüíferos por metais pesados, resíduos de produtos químicos agrícolas, corantes, entre outros. Nesse cenário, a área da biorremediação de contaminantes tem-se mostrado promissora e em expansão. Além disso, a biotecnologia microbiana pode contribuir com a obtenção de energias mais limpas, metabólitos secundários com atividades antibióticas e enzimas industriais (AZEVEDO et al., 2018)

Os fungos são microrganismos de grande relevância na biotecnologia. Sua aplicação abrange desde a fabricação de alimentos até a indústria farmacêutica, além de desempenharem um papel crucial em processos de biorremediação, como a degradação de petróleo e pigmentos. Embora o interesse por esse campo tenha aumentado recentemente, já em 8.000 a.C. a humanidade utilizava princípios biotecnológicos na elaboração de bebidas lácteas fermentadas no Egito e na Babilônia, mesmo sem ter conhecimento sobre a presença de microrganismos e seu papel na fermentação. Assim, os fungos emergem como microrganismos de grande valor biotecnológico. A atuação e o investimento em biotecnologia variam globalmente, influenciados por fatores como recursos naturais, situação econômica, política e características das empresas, além da atuação dos setores público e privado. Diante disso, este trabalho tem como objetivo reunir informações sobre o potencial biotecnológico dos fungos e seus principais metabólitos, com base em dados da literatura existente (Hyde; Xu; Rapior; Jeewon *et al*., 2019; Zhang; Dong *et al*. 2017)

A biotecnologia que utiliza produtos oriundos de fungos é responsável por um setor bilionário em expansão acelerada, atuando nas indústrias de alimentos e farmacêutica, com os fungos filamentosos desempenhando um papel central na fabricação de enzimas, medicamentos e substâncias químicas (Meyer; Basenko; Benz; Braus *et al*., 2020).

Além dos itens oferecidos, profissionais de diversas disciplinas, incluindo engenharia e biologia, estão desenvolvendo o uso de fungos na criação de produtos que apresentam uma menor emissão de carbono. Este enfoque vai além das áreas tradicionais, abrangendo aplicações em setores como o espacial, automotivo, têxtil e da construção civil; e a qualidade desses novos produtos pode ser igual ou até superior à dos disponíveis atualmente (Meyer; Basenko; Benz; Braus *et al*., 2020).

A forma dos fungos é diversificada, podendo ser unicelular, como as leveduras, ou pluricelular, como os filamentosos. Os fungos filamentosos são formados por um arranjo de células em forma cilíndrica que podem ser multinucleadas e separadas por septos, podendo também ser cenocíticas. A combinação dessas estruturas origina o micélio. Em contrapartida, as leveduras são compostas por pseudo-hifas, que são as estruturas conhecidas como brotos que se multiplicam e permanecem unidas umas às outras com constrições nos sítios septais. Essas estruturas fúngicas, cumprem tanto o papel vegetativo, como o reprodutivo

Atualmente, existem cerca de 120.000 espécies de fungos, organizadas em 19 filos: *Aphelidiomycota, Ascomycota, Basidiobolomycota, Basidiomycota, Blastocladiomycota, Calcarisporiellomycota, Caulochytriomycota, Chytridiomycota, Entomophthoromycota, Entorrhizomycota, Glomeromycota, Kickxellomycota, Monoblepharomycota, Mortierellomycota, Mucoromycota, Neocallimastigomycota, Olpidiomycota, Rozellomycota e Zoopagomycota*. Embora haja uma vasta diversidade entre os fungos, alguns especialistas afirmam que o total de espécies catalogadas é inferior ao real, estimando que conhecemos menos de 5% da verdadeira variedade deste grupo. (WIJAYAWARDENE et al., 2020; JANBON et al., 2019; Lino-NETO et al., 2019; HYDE; XU; RAPIOR; JEEWON et al., 2019)

A variedade de grupos e a rica gama de características que compõem o reino Fungi conferem a esses organismos uma notável habilidade de adaptação e sobrevivência, tornando-os fundamentais tanto do ponto de vista biológico quanto econômico. Todos os dias, as pessoas usufruem de produtos que têm origem direta ou indireta em fungos, como alimentos, bebidas fermentadas, bebidas alcoólicas, medicamentos, tratamentos biológicos para efluentes, produção de enzimas com valor industrial e processos de biotransformação, entre outros. Dada a sua importância, compreender os principais grupos, suas propriedades e a distribuição no meio ambiente é essencial para o desenvolvimento de estratégias voltadas à descoberta e exploração de novos recursos biológicos (ANDRADE et al., 2023; HYDE; XU; RAPIOR; JEEWON et al., 2019)

Os fungos são vistos como um dos principais geradores de compostos bioativos, que podem ser divididos em primários e secundários. Os metabólitos primários são substâncias que desempenham um papel fundamental nos processos de crescimento vegetativo dos fungos, incluindo a função de armazenamento de energia e estruturas. Em contrapartida, os metabólitos secundários não desempenham funções essenciais nos fungos, mas são fundamentais para a sobrevivência desses organismos em relação ao ambiente, sendo produzidos durante a fase estacionária. Na biotecnologia e no contexto ambiental, esses metabólitos são valiosos devido à sua diversidade de compostos bioativos, ajudando os fungos a se adaptarem a estresses bióticos e abióticos, além de apresentarem propriedades antimicrobianas, anti-inflamatórias, antifúngicas e antivirais. (DEVI; KAUR; GULERIA; RANA et al., 2020; RANA; KOUR; SHEIKH; YADAV et al., 2019; WATSON, 2019; ALAMGIR, 2018; ABREU; RODOVIDA; PHAMPHILE, 2015)

Desde a segunda Revolução Industrial até o presente, a demanda por produtos em maior quantidade e melhor qualidade aumentou. Como resultado, a exploração extrativista foi intensificada, o que acaba por prejudicar a saúde e o bem-estar da população. Ademais, a busca por produtos ecologicamente sustentáveis e biodegradáveis tem sido um compromisso significativo para países tanto desenvolvidos quanto em desenvolvimento (LOPES et al., 2021).

Nesse contexto, a biotecnologia microbiana se revela como uma ferramenta altamente significativa para a remediação de ambientes poluídos e para a produção de produtos naturais (PNs) que possam substituir compostos químicos sintéticos não degradáveis. Assim, a aplicação de microrganismos, como fungos e bactérias, se mostra crucial nesse processo (IBER et al., 2022; SILVA et al., 2014)

Os microrganismos desempenham diversas funções na biotecnologia, e dependendo das espécies envolvidas, essas funções podem ser extremamente benéficas para setores como a indústria alimentícia, farmacêutica e agronegócio. Atualmente, fungos e bactérias são os microrganismos mais utilizados na biotecnologia, embora exista a possibilidade de empregar protozoários e vírus (CAVALLI, 2020).

Os microrganismos presentes no solo (rizosféricos) e nas plantas (endofíticos), que têm a capacidade de promover o crescimento vegetal, representam uma opção promissora tanto para a agricultura quanto para a preservação ambiental. Dentre os gêneros que se destacam, estão o Bacillus e o Pseudomonas, Azospirillum, Trichoderma, Burkholderia, Enterobacter, Serratia, Flavobacterium, Frankia, Klebsiella, Clostridium, Beauveria, Rhizobiume Streptomyces. Inoculantes microbianos, incluindo rizobactérias (Plant growth-promoting rizhobacteria-PGPR), micorrizas e fungos, podem ser aplicados, seja em combinação ou individualmente, em sementes, folhas, raízes ou no solo. Esses microrganismos colonizam a rizosfera ou o interior das plantas e promovem seu crescimento de maneira direta, atuando como biofertilizantes e bioestimulantes, ou de forma indireta, funcionando como agentes de biocontrole. (Hesham, et al. 2021; Chouan et al., 2021; Rezende et al., 2021; Msimbira & Smith, 2020; Umesha et al., 2018).

Os fungos, por exemplo, possuem uma notável capacidade de gerar metabólitos, como as enzimas quitinases e quitosanases, que são amplamente empregadas em vários setores da indústria. As bactérias, por outro lado, também se revelam parceiras valiosas na biotecnologia microbiana, com aplicações em diferentes áreas, incluindo a produção de medicamentos, alimentos, a redução de resíduos plásticos e a produção de nanopartículas (TAVARES, 2023; OSTOS ORTIZ et al., 2019)

Nesse cenário, a incorporação de microrganismos aliada à biotecnologia pode contribuir para a educação ambiental, visto que os processos biotecnológicos abrangem diversas áreas do cotidiano. O uso de compostos bioativos derivados de fungos oferece múltiplos benefícios, tanto para a saúde humana quanto para o ecossistema. Biotecnologia refere-se à aplicação de organismos, sistemas ou processos, assim como a qualquer fração, tecido ou célula presentes neles, com intuito de aplicação industrial, por meio das ciências biológicas e da engenharia (JACOBY; KOPRIVOVA; KOPRIVA, 2021; LOPES et al., 2021; MUKHERJEE et al., 2018).

3.3. BIOTECNOLOGIA MICROBIANA TERMICA

A Biotecnologia se apresenta como uma ferramenta essencial para alcançar os objetivos relacionados à sustentabilidade. O uso de microrganismos na remediação de ambientes poluídos, visando a descontaminação ou a diminuição da carga de poluentes, é conhecido como biorremediação. Esses microrganismos têm a habilidade de acumular e converter diversos poluentes em compostos menos tóxicos, consumindo pouca energia e causando poucos efeitos nas características ambientais. Por isso, são vistas como alternativas de baixo custo em comparação aos métodos tradicionais de tratamento (Santos *et al.*, 2018)

Trata-se de uma metodologia que pode ser executada por diversos microrganismos, como bactérias, fungos e leveduras, os quais desempenham um papel essencial na degradação de contaminantes nocivos, permitindo a geração de energia mediante a conversão ou eliminação de poluentes orgânicos por meio da decomposição (Santos *et al.*, 2018)

Os microrganismos representam uma fonte abundante de várias moléculas, muitas das quais têm aplicações como combustíveis, produtos químicos especiais, polímeros, medicamentos, nutracêuticos, antibióticos e enzimas industriais, entre outros. Por conta disso, eles estão sendo cada vez mais reconhecidos como elementos chave na bioeconomia. O crescente interesse na produção de combustíveis e químicos a partir de recursos renováveis tem impulsionado uma série de pesquisas voltadas ao desenvolvimento de sistemas microbianos capazes de gerar diversos bioprodutos. Muitas empresas líderes em distintos setores já estão adotando soluções biotecnológicas fundamentadas em microrganismos para criar processos produtivos sustentáveis de combustíveis e diferentes substâncias químicas (Fávaro, 2012)

Dentro do contexto das utilizações microbianas na biotecnologia convencional, a importância dos microrganismos é comumente considerada em função de suas aplicações diretas nos processos biotecnológicos ou do valor comercial dos produtos gerados. No entanto, os benefícios indiretos associados às biotecnologias que utilizam processos microbianos, como as vantagens ambientais e sociais resultantes do tratamento de resíduos industriais e da mitigação da poluição, geralmente não são levados em conta (Canhos; Manfio, 2015)

No setor industrial, há um crescente interesse na utilização de um número restrito de plataformas microbianas para a produção de diferentes combustíveis e produtos químicos. Essa abordagem proporciona flexibilidade nas linhas de produção, que exigem investimentos consideráveis. Entre os produtos químicos renováveis gerados por processos microbianos, merecem destaque vários intermediários químicos, que funcionam como blocos fundamentais para a criação de compostos com alto valor agregado (Fávaro, 2012)

A adoção de ferramentas de biologia de sistemas possibilitou um melhor entendimento sobre como modificações ou a adição de vias biossintéticas afetam o metabolismo global da célula microbiana em condições de fermentação em biorreatores. Uma forma de prever os efeitos da inserção ou exclusão de genes ou de vias inteiras no crescimento ou na produção de um determinado produto é através do uso de modelos metabólicos. Esses modelos preditivos têm sido desenvolvidos a partir da integração de dados provenientes da genômica e da transcriptômica. proteômica, metabolômica e fluxômica (Fávaro, 2012)

A utilização de abordagens da biologia de sistemas tem possibilitado a identificação de alvos para o aprimoramento genético de forma mais lógica e orientada. Através de modelos matemáticos robustos do metabolismo, tem sido viável detectar alvos *in silico* e validar esses alvos, visando o aumento da produção de etanol em S. cerevisiae, além de otimizar as vias biossintéticas para a produção de 1,4-butanodiol e 1,3-propanodiol em *E. coli* a partir de fontes renováveis (Fávaro, 2012)

Aderindo a princípios claros, essas coleções de componentes biológicos que são padronizados e reutilizáveis têm o potencial de serem valiosas na criação de dispositivos que executem funções biológicas complexas e previsíveis. Os dispositivos de biologia sintética atualmente disponíveis devem auxiliar na engenharia metabólica de

microorganismos. Na verdade, diversos dispositivos de biologia sintética, como sistemas dinâmicos de sensores e reguladores, têm sido empregados para otimizar a produção de biocombustíveis em microorganismos, como o éster etílico de ácido graxo em *E. coli* (Fávaro, 2012)

Os fertilizantes organominerais representam uma opção atrativa para a agricultura. Sua elaboração pode ser feita na forma de grânulos, contendo uma elevada concentração de fósforo solúvel, após a conversão biológica de resíduos de origem animal, combinados com minerais. Esse aspecto é o principal desafio tecnológico para expandir a utilização desses fertilizantes no Brasil (Cotta; Oliveira; Marriel, 2016)

Microrganismos termófilos são aqueles que conseguem se desenvolver em temperaturas superiores a 55°C. Esses organismos geram enzimas que permanecem ativas em ambientes de alta temperatura, denominadas termoenzimas ou enzimas termoestáveis. Essa característica permite sua aplicação em diversos processos industriais que requerem tais condições extremas (Cotta; Oliveira; Marriel, 2016)

A compostagem é um método aeróbico de decomposição biológica que geralmente se aplica a resíduos sólidos oriundos de várias fontes, incluindo lixo urbano, resíduos agroindustriais e agropecuários. Este processo é promovido pela atividade de microrganismos como bactérias, actinobactérias e fungos, que estão normalmente presentes nos materiais em decomposição, e inclui uma fase de aquecimento. Como se trata de um processo essencialmente microbiológico, a sua eficácia é influenciada pela ação e interação dos micróbios, que necessitam de condições adequadas de temperatura, umidade, oxigenação, pH, tipo de material orgânico disponível e a proporção de carbono para nitrogênio (CIN), granulometria do material e as dimensões das leiras. Os principais nutrientes encontrados nos resíduos animais e vegetais estão na forma orgânica e são decompostos em diferentes estágios por diferentes populações de microrganismos que secretam enzimas e digerem o seu alimento fora da célula (Cotta; Oliveira; Marriel, 2016)

4. CONCLUSÕES

A partir da evolução da ciência deu-se inicio a biotecnologia, ao qual tem se tornado uma ferramenta de grande auxilio para a evolução de métodos e produtos que permitem o melhor aproveitamento dos recursos, suas qualidades, diminuindo os impactos negativos ao meio ambiente.

Diante disto, a utilização de microrganismos tem se apresentado como uma nova ferramenta ao qual tem permitido a elaboração de novos produtos para o setor da agroindústria, assim como uma fonte em potencial para o desenvolvimento de energia térmica, uma vez que parte dos microrganismos passam a exercer melhor função em altas temperaturas, como também vem a produzir substancias, como por exemplo gases, que podem ser utilizados para a combustão.

Conclui-se assim que a utilização de microrganismo por parte da biotecnologia torna-se um campo proveitoso e de grandes resultados para o desenvolvimento de novos recursos que venham a ser utilizados nas diversas áreas da sociedade

REFERÊNCIAS

[1] AGÊNCIA BRASILEIRA DE DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL. Disponível em: <http://www.abdi.com.br/?q=node/22, 2009>. Acesso em: 24 nov. 2024

[2] ALAMGIR, A. N. M. Therapeutic use of medicinal plants and their extracts: Volume 2: phytochemistry and bioactive compounds. Springer, 2018.

[3] ABREU, J. A. S.; ROVIDA, A. F. S.; PAMPHILE, J. A. Fungos de Interesse: Aplicações Biotecnológicas. Universidade Estadual de Maringá – UEM. Revista UNINGÁ Review - Vol.21,nº 1, pp.55-59 (Jan – Mar 2015)

[4] ANDRADE, Hortência Farias de *et al*. Potencial biotecnológico dos fungos. In: SILVA, Silvia Katrine Rabelo da; SOUSA, Sara Freitas de; SANTANA, Raphael Carlos Ferrer de. Biotecnologia microbiana. Guarujá: Científica Digital, 2023. p. 43-62. Disponível em: https://downloads.editoracientifica.com.br/books/978-65-5360-269-4.pdf. Acesso em: 28 nov. 2024.

[5] ANDRADE, M. M. Introdução à metodologia do trabalho científico: elaboração de trabalhos na graduação. São Paulo, SP: Atlas, 2010.

[6] AZEVEDO, João Lúcio *et al*. Biotecnologia microbiana ambiental. Maringá: Eduem, 2018. 331 p. Disponível em: https://www.dmp.ufscar.br/arquivos/biotecnologia-microbiana-ambiental.pdf. Acesso em: 27 nov. 2024.

[7] BRASIL, MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Resenha Energética Brasileira - Exercício de 2018. Edição 2019, v.3, Brasília- DF, p. 1-32, 2019. Disponível em: http://www.mme.gov.br/web/guest/publicacoes-e-indicadores. Acesso em: 29 de nov de 2024.

[8] BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. 2010. Disponível em: < <http://www.agricultura.gov.br/>. Acesso em: 14 nov. 2024

[9] BRITO, Ana Paula Gonçalves; OLIVEIRA, Guilherme Saramago de; SILVA, Brunna Alves da. A IMPORTÂNCIA DA PESQUISA BIBLIOGRÁFICA NO DESENVOLVIMENTO DE PESQUISAS QUALITATIVAS NA ÁREA DE EDUCAÇÃO. Cadernos da Fucamp, On Line, v. 20, n. 44, p. 1-15, mar. 2021. Disponível em: https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://revistas.fucamp.edu.br/index.php/cadernos/article/view/2354/1449&ved=2ahUKEwjA38v3yLqJAxV9BbkGHWA7DasQFnoECFAQAQ&usg=AOvVaw2oRABISB1Cmqxb5a8ppGXm. Acesso em: 30 out. 2024.

[10] BURITI, Flávia Carolina Alonso *et al*. Aplicação da biotecnologia na produção e desenvolvimento de alimentos funcionais: uma revisão. Boletim do Centro de Pesquisa de Processamento de Alimentos, [S.L.], v. 37, n. 1, p. 1-21, 11 maio 2021. Universidade Federal do Paraná. http://dx.doi.org/10.5380/bceppa.v1i1.53060. Disponível em: https://revistas.ufpr.br/alimentos/article/view/53060. Acesso em: 30 out. 2024.

[11] CANHOS, Vanderlei Perez; MANFIO, Gilson Paulo. Recursos Microbiológicos para Biotecnologia. On Line: Aa, 2015. 28 p. Disponível em: https://www.faecpr.edu.br/site/documentos/recursos_microbiologicos_biotecnologia.pdf. Acesso em: 30 out. 2024.

[12] CAVALLI, R. O. Introdução à Biotecnologia Marinha. In: Biotecnologia Marinha. 2020.

[13] CEARÁ. Governo do Estado do Ceará. Secretaria de Educação. Biotecnologia: microbiologia industrial. Fortaleza: Secretaria da Educação do Estado do Ceará, 2014. 63 p. Disponível em: https://www.seduc.ce.gov.br/wp-content/uploads/sites/37/2014/07/biotecnologia_microbiologia_vegetal.pdf. Acesso em: 28 nov. 2024.

[14] CEARÁ. Governo do Estado do Ceará. Secretaria de Educação. Fundamentos de Biotecnologia. Fortaleza: Secretaria da Educação do Estado do Ceará, 2014. 117 p. Disponível em: https://www.seduc.ce.gov.br/wp-content/uploads/sites/37/2014/07/biotecnologia_fundamentos_de_biotecnologia.pdf. Acesso em: 27 nov. 2024.

[15] CHOUHAN, D. K., JAISWAL, D. K. GAURAV, A. K., MUKHERJEE, A. & VERMA, J. P. PGPM as a potential bioinoculant for enhancing crop productivity under sustainable agriculture. In: Rakshit, A., Meena, V. S. M. P., Singh, H.B. & Singh A.K. (org). Biofertilizers, Woodhead Publishing, 221-237. 2021

[16] COTTA, Simony Pimenta Mascarenhas; OLIVEIRA, Christiane Abreu de; MARRIEL, Ivanildo Evódio. POTENCIAL BIOTECNOLÓGICO DE MICRORGANISMOS TERMÓFILOSSOLUBILIZADORES DE FOSFATO E PRODUTORES DE ENZIMAS HIDROLíTICAS. Saberes, On Line, v. 1, n. 1, p. 92-97, jan. 2016. Disponível em: https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/164197/1/Potencial-biotecnologico.pdf. Acesso em: 31 out. 2024.

[17] DANELON, Jacqueline Bombonatto. Biotecnologia e produção de alimentos. On Line, v. 1, n. 1, p. 1-6, set. 2019. Disponível em: https://www.hu.usp.br/wp-content/uploads/sites/512/2019/09/9_Biotecnologia_e_producao_de_alimentos.pdf. Acesso em: 30 out. 2024.

[18] DEVI, R.; KAUR, T.; GULERIA, G.; RANA, K. L. et al. Chapter 9 - Fungal secondary metabolites and their biotechnological applications for human health. In: New and Future Developments in Microbial Biotechnology and Bioengineering: Elsevier, 2020. p. 147-161.

[19] FALEIRO, Fábio Gelape; ANDRADE, Solange Rocha Monteiro de. Biotecnologia: uma visão geral. In: FALEIRO, Fábio Gelape; ANDRADE, Solange Rocha Monteiro de; REIS JUNIOR, Fábio Bueno dos (ed.). Biotecnologia: estado da arte e aplicações na agropecuária. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2011. p. 13-29. Disponível em: https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://livroaberto.ibict.br/bitstream/1/907/1/Biotecnologia_estado_arte_aplicacoes_agropecuaria.pdf&ved=2ahUKEwj3w4_avIqKAxW1q5UCHYsfACUQFnoECCgQAQ&usg=AOvVaw2N59rptUfCkRTcsrsnKO7O. Acesso em: 27 nov. 2024.

[20] FÁVARO, Léia Cecilia de Lima. MELHORAMENTO GENÉTICO DE MICRORGANISMOS PARA PRODUÇÃO DE BIOCOMBUSTÍVEIS E QUÍMICOS RENOVÁVEIS: integração de abordagens de biologia molecular, biologia sistêmica, biologia sintética e engenharia metabólica. Agroenergia em Revista, On Line, v. 5, p. 32-35, 2012. Disponível em: https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/955044/1/Agroenergiaemrevistan.5Leia.pdf. Acesso em: 30 out. 2024.

[21] FIVGA, A.; SPERANZA, L. G.; BRANCO, C. M.; OUADI, M.; HORNUNG, A. A review on the current state of the art for the production of advanced liquid biofuels. Aims Energy, v. 7, n. 1, p. 46-76, 2019.

[22] FONSECA, Isadora Mendes da *et al*. DA BANCADA AO MERCADO: inovação tecnológica impulsionando a microbiologia industrial. In: COSTA, Romero Marcos Pedrosa Brandão *et al*. BIOTECNOLOGIA MICROBIANA E SUAS APLICAÇÕES NO MEIO AMBIENTE. Belem: Rfb, 2023. p. 9-26. Disponível em: https://www.rfbeditora.com/_files/ugd/baca0d_39d5572965a946528b9a49901cf789a8.pdf. Acesso em: 30 out. 2024.

[23] GOETTERT, Márcia Inês *et al* (org.). OFICINAS DE BIOTECNOLOGIA PARA O ENSINO MÉDIO. Lajeado: Editora Univates, 2021. 84 p. Disponível em: https://www.univates.br/editora-univates/media/publicacoes/349/pdf_349.pdf. Acesso em: 30 out. 2024.

[24] HEMANSI, G. R.; YADAV, G.; KUMAR, G.; YADAV, A.; SAINI, J. K.; KUHAD, R. C. Second generation bioethanol production: the state of art. Sustainable approaches for biofuels production technologies, p. 121-146, 2019.

[25] HESHAM, A. E. L., KAUR, T., DEVI, R., KOUR, D., PRASAD, S., YADAV, N., SINGH, C., SINGH, J. &YADAV, A. J.. Current Trends in Microbial Biotechnology for Agricultural Sustainability: Conclusion and Future Challenges. Environmental and Microbial Biotechnology. Elsevier, 555–572. 2021

[26] HYDE, K. D.; XU, J.; RAPIOR, S.; JEEWON, R. *et al*. The amazing potential of fungi: 50 ways we can exploit fungi industrially. Fungal Diversity, 97, n. 1, p. 1-136, 2019.

[27] IBER, BT.; KASAN, NA, TORSABO, D.; OMUWA, JW. Uma revisão de várias fontes de quitina e quitosana na natureza. Journal of Renewable Materials. v. 10, n. 4, p. 1097, 2022.

[28] ITO, A.G.T.P. Biotecnologia e produção de alimentos. Londrina: Editora e Distribuidora Educacional S.A., 192 p., 2018.

[29] JACOBY, R. P.; KOPRIVOVA, A.; KOPRIVA, S. Pinpointing secondary metabolites that shape the composition and function of the plant microbiome. J Exp Bot, 72, n. 1, p. 57-69, Jan 20 2021

[30] JANBON G, QUINTIN J, LANTERNIER F, D'ENFERT C. Studying fungal pathogens of humans and fungal infections: fungal diversity and diversity of approaches. Genes Immun 20: 403–414, 2019.

[31] KUMAR, A.; RAO, K. M.; HAN, S. S. Application of xanthan gum as polysaccharide in tissue engineering: a review. Carbohydrate Polymers, v. 180, p. 128–144, 2018.

[32] LEMÕES, Juliana Silva; LEMÕES, Lucas Silva; MASCARENHAS, Luize Silva. BIOTECNOLOGIA NA PRODUÇÃO DE ETANOL DE SEGUNDA GERAÇÃO. In: SILVA, Estela Fernandes e; MACAGNAN, Karine Laste; CARDOSO, Tainã Figueiredo. BIOTECNOLOGIA: um panorama ao longo dos séculos. Iguatu: Quipá Editora, 2021. p. 23-37. Disponível em: https://educapes.capes.gov.br/bitstream/capes/644360/2/Biotecnologia%3A%20um%20panorama%20ao%20longo%20dos%20s%C3%A9culos.pdf. Acesso em: 25 nov. 2024.

[33] LINO-NETO, GOMES, T., PEREIRA, J.A., T. et al. Bacterial disease induced changes in fungal communities of olive tree twigs depend on host genotype. Sci Rep 9, 5882. 2019. https://doi.org/10.1038/s41598-019-42391-8. Disponível em: https://www.nature.com/articles/s41598-019-42391-8. Acesso em: 25 nov. 2024.

[34] LOPES, M. J., et al. Biotecnologia microbiana: inoculação, mecanismos de ação e benefícios às plantas. Research, Society and Development, v. 10, n. 12, p. e356101220585- e356101220585, 2021.

[35] LOPES, M. J. dos S.; et al. Microbial biotechnology: inoculation, mechanisms of action and benefits to plants. Research, Society and Development, *[S. l.]*, v. 10, n. 12, p. e356101220585, 2021. DOI: 10.33448/rsd-v10i12.20585. Disponível em: https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/20585. Acesso em: 26 nov. 2024.

[36] MUKHERJEE, S., TUCKER-BURDEN, C., KAISSI, E., NEWSAM, A., DUGGIREDDY, H., CHAU, M., ZHANG, C., DIWEDI, B., RUPJI, M., SEBY, S., KOWALSKI, J., KONG, J., READ, R., BRAT, D.J. CDK5 Inhibition Resolves PKA/cAMP-Independent Activation of CREB1 Signaling in Glioma Stem Cells. Cell Rep. 23(6): 1651—1664, 201

[37] Msimbira, L. A., & Smith, D. L. The roles of Plant Growth Promoting Microbes in enhancing plant tolerance to acidity and alkalinity stresses. Frontiers in Sustainable Food Systems,4, 1–14. 2020

[38] LOSEKANN, L.; TAVARES, A. Transição energética e potencial de cooperação nos BRICS em energias renováveis e gás natural. 2021.

[39] OSTOS-ORTÍZ, O. L., et al. Aplicaciones biotecnológicas de los microorganismos. Nova, v. 17, n. 31, p. 129-163, 2019.

[40] PIZZANI, L. *et al.* A arte da pesquisa bibliográfica na busca do conhecimento. RDBCI: Revista Digital de Biblioteconomia e Ciência da Informação, Campinas, SP, v. 10, n. 2, p. 53–66, jul./dez, 2012.

[41] PRODANOV, C. C.; FREITAS, E. C. Metodologia do trabalho científico: métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico. Novo Hamburgo, RS: Feevale, 2013.

[42] RAMOS, Márcio Viana; MELO, Dirce Fernandes de; SILVA, André Luis Coelho da (org.). Biotecnologia: a ciência, o bacharelado, a demanda socioeconômica. Fortaleza: Imprensa Universitária, 2016. 115 p. Disponível em: https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/19474/1/2016_liv_mvramos.pdf. Acesso em: 30 nov. 2024.

[43] RANA, K. L.; KOUR, D.; SHEIKH, I.; YADAV, N. et al. Biodiversity of Endophytic Fungi from Diverse Niches and Their Biotechnological Applications. In: Advances in Endophytic Fungal Research: Present Status and Future Challenges. Cham: Springer International Publishing, 2019. p. 105-144

[44] REZENDE, C. C. SILVA, M. A., FRASCA, L. L. M., FARIA, D. R., FILIPPI, M. C. C., LANNA, A. C. & NASCENTE, A. S. . Microrganismos multifuncionais: utilização na agricultura. Research, Society and Development, 10, 2, e50810212725. 2021

[45] ROMANO, L.H. *et al*. REVIEW: aplicação de microorganismos e biologia molecular na produção de bioenergia. Saúde em Foco, Amparo, v. 1, n. 8, p. 95-104, jan. 2016. Disponível em: https://portal.unisepe.com.br/unifia/wp-content/uploads/sites/10001/2018/06/010_microorganismos_bioenergia.pdf. Acesso em: 30 out. 2024.

[46] SANTOS, Emília Mendes da Silva *et al*. BIOTECNOLOGIA: utilização de microrganismos para o processo de biorremediação em ambientes contaminados - perspectivas tecnológicas. In: CONGRESSO NACIONAL DE EDUCAÇÃO, 5., 2018, Recife. ANAIS DO V CONGRESSO NACIONAL DE EDUCAÇÃO. Recife: Realize, 2018. p. 1-6. Disponível em: https://editorarealize.com.br/edicao/detalhes/anais-v-conedu. Acesso em: 31 out. 2024.

[47] SCHÜRRLE, K. History, current state, and emerging applications of industrial biotechnology. Advances in Biochemical Engineering/Biotechnology, v. 173, p. 13-51, 2020.

[48] SILVA, Estela Fernandes e; MACAGNAN, Karine Laste; CARDOSO, Tainã Figueiredo. BIOTECNOLOGIA: breve histórico e a presença nos diversos campos da sociedade. In: SILVA, Estela Fernandes e; MACAGNAN, Karine Laste; CARDOSO, Tainã Figueiredo (org.). BIOTECNOLOGIA: um panorama ao longo dos séculos. Iguatu: Quipá Editora, 2021. p. 9-22. Disponível em: https://educapes.capes.gov.br/bitstream/capes/644360/2/Biotecnologia%3A%20um%20panorama%20ao%20longo%20dos%20s%C3%A9culos.pdf. Acesso em: 30 out. 2024.

[49] SILVA, J.S; SILVA SANTOS, S.; GOMES, F.G.G. A biotecnologia como estratégia de reversão de áreas contaminadas por resíduos sólidos. Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental. v. 18, n. 4. p. 1361-1370. 2014.

[50] SOUSA, Angélica Silva de; OLIVEIRA, Guilherme Saramago de; ALVES, Laís Hilário. A PESQUISA BIBLIOGRÁFICA: princípios e fundamentos. Cadernos da Fucamp, On Line, v. 20, n. 43, p. 64-83, nov. 2021. Disponível em: https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://revistas.fucamp.edu.br/index.php/cadernos/article/view/2336/1441&ved=2ahUKEwjA38v3yLqJAxV9BbkGHWA7DasQFnoECCMQAw&usg=AOvVaw2QSfEc5fL6oNTE2o8lkw4k. Acesso em: 30 out. 2024.

[51] TAVARES, Victor Daniel Firmino dos Santos. Sequências didáticas como ferramenta para o ensino de Biotecnologia Microbiana no Ensino Médio. 2023. 49 f. TCC (Graduação) - Curso de Ciências Biológicas, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2023. Disponível em: https://www.repositorio.ufal.br/bitstream/123456789/13645/1/Sequ%c3%aancias%20did%c3%a1ticas%20como%20ferramenta%20para%20o%20ensino%20de%20Biotecnologia%20Microbiana%20no%20Ensino%20M%c3%a9dio.pdf. Acesso em: 27 nov. 2024.

[52] TIAN J, FU L, ZHANG Z, DONG X, XU D, MAO Z, LIU Y, LAI D, ZHOU L. Dibenzo-α-pyrones from the endophytic fungus Alternaria sp. Samif01: isolation, structure elucidation, and their antibacterial and antioxidant activities. Nat Prod Res. 2017 Feb;31(4):387-396. doi: 10.1080/14786419.2016.1205052. Epub 2016 Jul 7. PMID: 27388053. Disponível em: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/27388053/. Acesso em: 30 out. 2024.

[53] Umesha, S., K. Singh, P., & P. Singh, R. Microbial Biotechnology and Sustainable Agriculture. Biotechnology for Sustainable Agriculture, 185–205. 2018

[54] VIDAL, M. F. Produção e uso de biocombustíveis no Brasil. 2019.

[55] WATSON, R. R. Index. In: Polyphenols in Plants (Second Edition): Academic Press, 2019. p. 421-424

[56] WIJAYAWARDENE, N. N. et al. Outline of Fungi and fungus-like taxa. Mycosphere, v. 11, n. 1, p. 1060-1456, 2020.

Capítulo 4

Análise termográfica na usinagem do aço inox 316

Karoline Stefany Ferreira da Luz[1]
Marcelio Ronnie Dantas de Sá[2]

Resumo: O artigo aborda o uso da termografia na usinagem do aço inoxidável 316, com foco na análise da temperatura em diferentes velocidades de corte. A usinagem é um processo de fabricação que remove material para atingir a forma desejada e exige controle rigoroso de parâmetros, como velocidade de corte e lubrificação, para garantir a qualidade e durabilidade da peça. Neste estudo, câmeras termográficas foram posicionadas para medir a temperatura gerada durante a usinagem, sem o uso de fluidos de corte, que interferem na emissão infravermelha. Os resultados indicaram que o aumento da velocidade de corte eleva significativamente a temperatura, o que contribui para o desgaste da ferramenta e influencia a qualidade do acabamento. A termografia se mostrou eficaz para monitorar essas variações térmicas, auxiliando na otimização dos parâmetros de usinagem, o que pode prolongar a vida útil das ferramentas e melhorar o processo produtivo no setor de manufatura.

Palavras–chave: Termografia, Velocidade de Corte, Desgaste da ferramenta

[1] Docente Metalmecânica do Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial – SENAI PE
[2] Docente Metalmecânica do Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial – SENAI PE

1. INTRODUÇÃO

A usinagem é um método de fabricação que envolve a remoção de material de uma peça bruta para atingir a forma e as dimensões desejadas. Essa técnica é amplamente utilizada em diversas indústrias para produzir componentes com alta precisão e acabamentos específicos. (FERRARESI, 2015).

Os parâmetros de corte na usinagem são fundamentais para otimizar o processo e incluem velocidade de corte, avanço, profundidade de corte, ângulo de corte e tipo de lubrificação. A velocidade de corte determina a rapidez com que a ferramenta se move em relação à peça, enquanto o avanço define a distância que a ferramenta avança por unidade de tempo. A profundidade de corte indica o quanto a ferramenta penetra na peça, e o ângulo de corte pode influenciar a qualidade do acabamento e o desgaste da ferramenta. (DINIZ et al., 2014). A escolha do fluido de corte também é crucial, pois impacta na temperatura e na durabilidade das ferramentas, tornando o ajuste adequado desses parâmetros essencial para a eficiência e qualidade do produto final. (SILVA; SOUZA, 2017).

O processo de usinagem do aço inox é fundamental em diversas áreas da engenharia e da fabricação, graças às propriedades únicas desse material, que incluem resistência à corrosão, durabilidade, higiene, versatilidade, estética e reciclabilidade. O aço inoxidável é uma liga de ferro com um percentual mínimo de cromo de 10,5%, além do níquel e um baixo percentual de carbono. (DIAS et al., 2012).

Apesar de suas excelentes propriedades mecânicas, a usinagem do aço inox ainda é uma área pouco explorada. O custo elevado é um dos principais fatores que levam muitos a optarem por materiais com propriedades semelhantes.

Um aspecto importante a ser considerado no processo de usinagem é a temperatura gerada pelo atrito entre a peça e a ferramenta. Conhecer os parâmetros ideais para usinagem do aço inox 316 é uma questão importante na produção de peças para vários setores. Entre os principais objetivos desse processo estão minimizar o desgaste das ferramentas e aumentar a qualidade das superfícies usinadas. (PEREIRA; CÂMARA, 2021).

A termografia é uma técnica de medição que emprega radiação infravermelha para criar imagens térmicas de objetos e superfícies. Essa abordagem possibilita a visualização e a medição da temperatura de um objeto sem contato físico, transformando as emissões de calor em imagens coloridas, onde as diferentes temperaturas são representadas por uma variedade de cores. A câmera termográfica é o instrumento que mede e visualiza a radiação infravermelha emitida por objetos, permitindo avaliar suas temperaturas sem contato direto. É uma técnica útil que fornece informações sobre a temperatura de forma rápida e não invasiva. (PAGOTTO, 2022). Apesar da importância do fluido de corte na usinagem do aço inox, sua utilização é inviável para análise termográfica. Isso ocorre porque a presença desses fluidos interfere na emissão dos raios infravermelhos, tornando impossível avaliar a temperatura nas interfaces de maneira precisa. (MACHADO et al., 2009).

No entanto, a presença de fluídos de corte altera a emissão dos raios infravermelhos e a temperatura nas interfaces não pode ser avaliada por esse método.

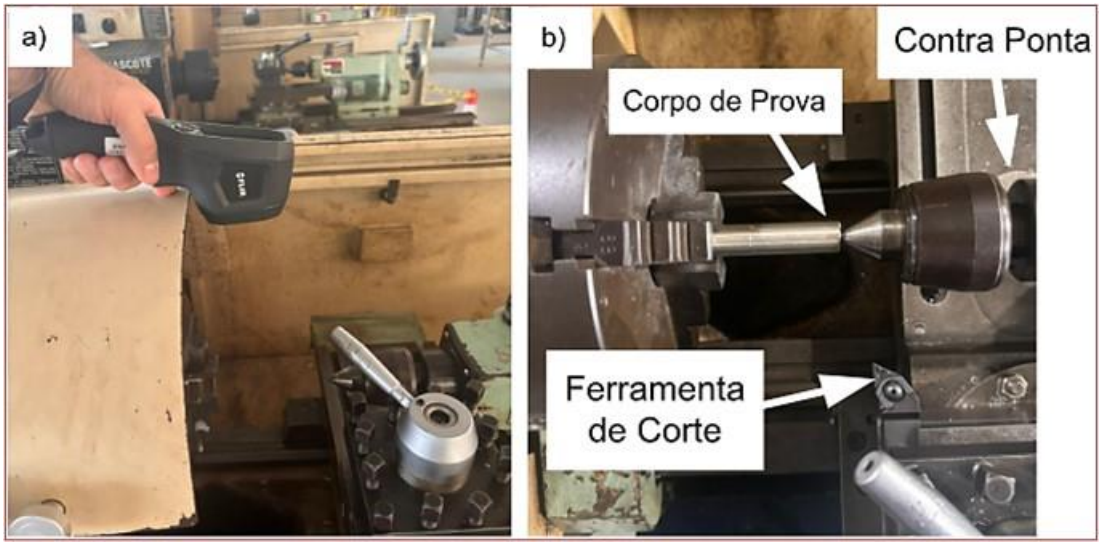
Este trabalho tem como objetivo aplicar a termografia no processo de usinagem do aço inox, visando realizar um comparativo entre as temperaturas quando levado em consideração diferentes velocidades de corte no processo de usinagem. O intuito é

maximizar a produtividade, melhorar a qualidade das peças usinadas e reduzir o desgaste das pastilhas de metal duro revestidas utilizadas nesse processo.

2. MATERIAL E MÉTODOS

A realização do experimento se deu através do posicionamento da câmera termográfica sobre o corpo de prova (CP) de modo que durante a usinagem fosse possível capturar a radiação gerada pelo calor produzido durante o corte. A captura da imagem se deu a uma posição de 0,3 m acima do CP, conforme visto na Figura 1, uma vez que a medida em que o corte acontecia, havia um aumento no calor transferido à ferramenta e à peça, dessa forma, a temperatura neste ponto seria o ponto referencial para comparação com os demais experimentos.

Figura 1 – a) Posicionamento da câmera termográfica sobre o CP. b) Vista superior do CP onde foi realizada a medição.



Fonte: Autoria Própria (2024).

Durante a usinagem, foi necessário o uso da contra-ponta do torno a fim de reduzir a vibração do CP e desgaste prematuro da ferramenta, afetando assim a geração de calor na operação.

O estudo deste trabalho foi realizado levando em consideração a variação da velocidade de corte (Vc) e mantendo-se a profundidade (Ap) e velocidade de avanço (f) constantes, uma vez que o primeiro parâmetro apresenta maior influência na temperatura (SHAW, 2005).

A opção pelo não uso do fluido de corte se deu devido a dificuldade de obtenção dos resultados, uma vez que o seu uso altera a emissão dos raios infravermelhos e afetando, assim, a leitura pela câmera termográfica.

O material usado neste experimento foi o aço inox AISI 316 com 19,05 mm (¾”) de diâmetro, cuja composição é descrita na Tabela 1.

TABELA 1- Composição Química do Aço inox 316.

Elemento	Carbono (C)	Silício (Si)	Manganês (Mn)	Fósforo (P)	Enxofre (S)	Cromo (Cr)	Níquel (Ni)	Molibdênio (Mo)
Composição (% em peso)	≤ 0,08	≤ 1,00	≤ 2,00	≤ 0,045	≤ 0,03	16,00 – 18,00	10,00 – 14,00	2,00 – 3,00

Fonte: NBR 5601 (2024)

A coleta de dados foi realizada através da Câmera Termográfica Flir Modelo TG267, cuja especificação é apresentada na Tabela 2.

TABELA 2 - Especificação da Câmera Termográfica Flir TG267.

PARÂMETRO	VALOR
Faixa de Temperatura	-25°C a 380°C
Precisão	±1,5 de 50°C a 100°C até ±3 de 100°C a 380°C
Resolução de IR	160 a 120 pixels
Distância Focal Mínima	0,3 m

Fonte: MANUAL DO UTILIZADOR (2021).

A câmera foi posicionada a uma distância de 0,3 m da peça, conforme as boas práticas de utilização informada no manual da câmera termográfica.

A máquina ferramenta usada nos experimentos foi o torno Nardini MS220 Gold, possui 5,5 HP (4 kW) e 380V.

Para o processo de desbaste, foi usado o inserto TNMG 160404 PF UN6020 montado ao suporte de ferramenta MTJNR-2020-K16. As condições de corte estabelecidas pelo fabricante para usinagem seguem conforme a Tabela 3.

TABELA 3 - Parâmetros da Ferramenta de Corte.

CONDIÇÕES DE CORTE DA FERRAMENTA - TNMG 160404 PF UN6020		
Parâmetro	**Valor**	**Unidade**
Velocidade de Corte (Vc)	120 - 350	m/min
Velocidade de Avanço (f)	0,05 - 0,6	mm/rot
Profundidade de corte (Ap)	0,5 - 3,5	mm

Fonte: Autoria própria (2024).

A aquisição dos dados foi realizada de acordo com a variação da velocidade de corte e obedecendo às limitações da máquina ferramenta e do diâmetro do corpo de prova. Para cada usinagem operada no torno, os parâmetros de avanço (f) foram mantidos constantes, com valor de 0,19 mm/rotação, assim como a profundidade de corte (Ap), com valor de 0,5 mm.

Dessa forma, foram utilizados os parâmetros de corte contidos na Tabela 4.

TABELA 4 - Parâmetros de corte dos experimentos.

Peça	Diâmetro (mm)	Vc (m/min)	Rotação (RPM)	f (mm/rotação)	Ap (mm)
1	**19,05**	**36**	600	0,05	0,5
2	**17,60**	**41**	750	0,05	0,5
3	**17,90**	**53**	950	0,05	0,5
4	**17,70**	**66**	1180	0,05	0,5
5	**14,80**	**70**	1500	0,05	0,5

Fonte: Autoria Própria (2024)

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após a realização de cinco experimentos utilizando os parâmetros apresentados na Tabela 4, foram obtidos os resultados que estão apresentados nas imagens coletadas pela câmera termográfica para diferentes valores de rotação apresentados na Figura 2 abaixo.

Figura 2 - Imagens termográficas coletadas sob diferentes velocidades de corte.

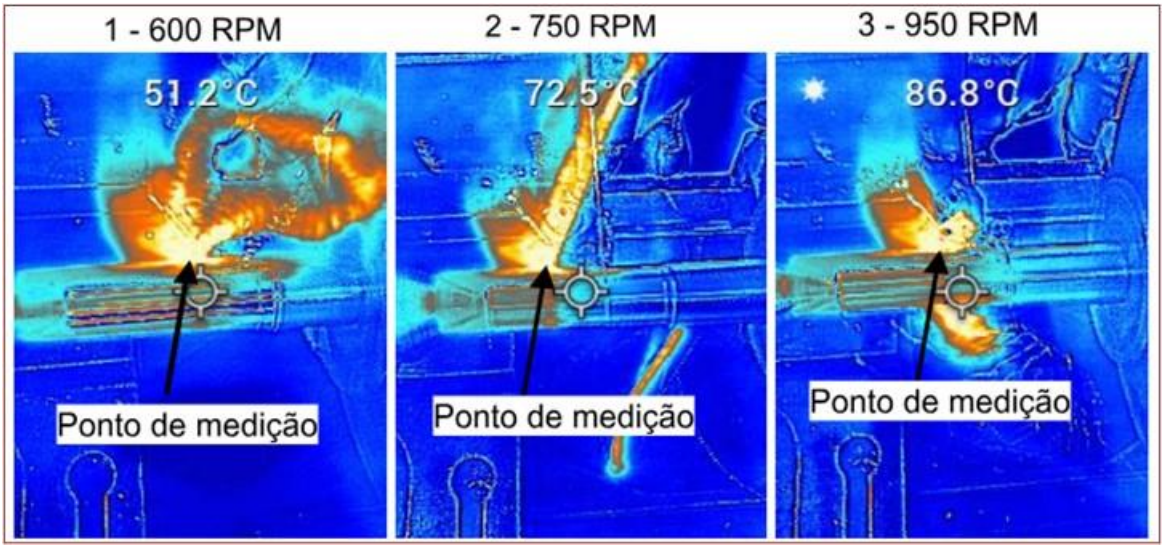
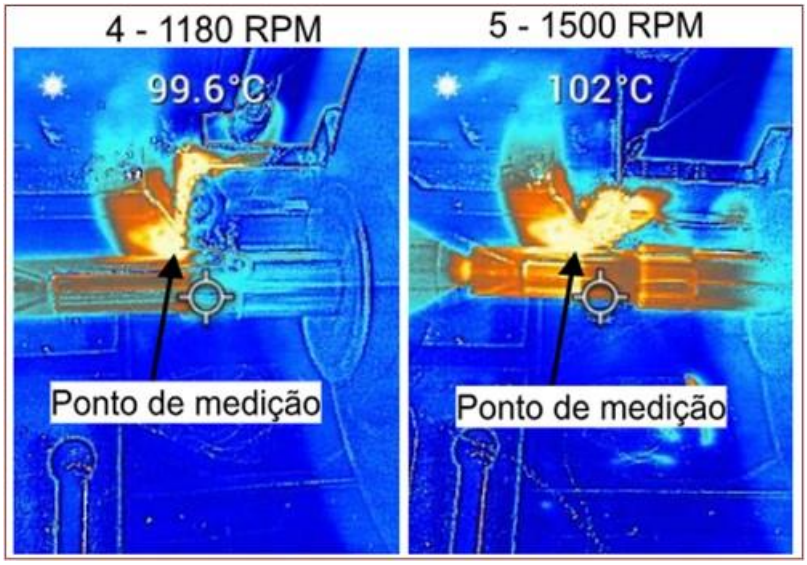


Figura 2 - Imagens termográficas coletadas sob diferentes velocidades de corte. (continuação)



Fonte: Autoria Própria (2024)

É importante ressaltar que durante o processo de medição, a câmera termográfica registra o ponto de temperatura em um local diferente do mostrado pelo símbolo central da imagem capturada. O local exato da medição é definido através de um feixe de luz vermelha que é representado na imagem como "ponto de medição". A escolha do local da medição se deu no ponto de contato entre a ferramenta e a peça, uma vez que esse local é onde ocorre a maior temperatura durante o processo de usinagem.

A Tabela 5 demonstra os 5 experimentos realizados, evidenciando a influência do aumento da velocidade de corte na temperatura de usinagem do corpo de prova do aço inox 316.

TABELA 5 - Influência do aumento da velocidade de corte na temperatura.

Experimento	Vc (m/min)	Rotação (RPM)	Temperatura (°C)
1	**36**	600	51,2
2	**41**	750	72,5
3	**53**	950	86,8
4	**66**	1180	99,6
5	**70**	1500	102

Fonte: Autoria Própria (2024).

Os resultados obtidos nos experimentos expressam um aumento na velocidade de corte de maneira crescente conforme as rotações escolhidas, sendo estas, limitadas pelas condições da máquina-ferramenta utilizada e pelo diâmetro do corpo de prova. No

Experimento 1, com uma velocidade de corte de 70 m/min, observou-se que a maior temperatura registrada foi de 102 °C.

Em contraste, o Experimento 5, que utilizou uma velocidade de corte de 36 m/min apresentou a menor temperatura que foi de 51,2 °C. Sendo o aumento da temperatura entre o Experimento 5 e o Experimento 1 de 100%, o que evidencia a influência significativa da velocidade de corte nas temperaturas geradas durante o processo de usinagem.

Sendo observado o aumento da temperatura em função do aumento da velocidade de corte, é evidenciado que há uma tendência de crescimento entre esses parâmetros, dessa forma, constata-se que quanto maior a velocidade de corte, maior será o calor gerado. Este crescimento da temperatura em função do aumento da velocidade de corte, também foi evidenciado por (NOGUEIRA et al, 2018).

Esses resultados destacam a relevância de analisar a relação entre a velocidade de corte e a temperatura, uma vez que temperaturas elevadas podem impactar tanto a eficiência do processo de usinagem quanto a vida útil das ferramentas. Assim, o controle eficaz da temperatura torna-se essencial para otimizar os processos de usinagem, evitar o desgaste precoce das ferramentas e assegurar a qualidade do acabamento das peças.

4. CONCLUSÕES

Conclui-se que a aplicação da termografia no processo de usinagem do aço inoxidável 316 permitiu uma análise detalhada das variações térmicas em diferentes velocidades de corte, revelando que a elevação da velocidade de corte impacta diretamente na temperatura da interface ferramenta-peça. Os resultados mostraram que velocidades de corte mais altas geraram temperaturas elevadas, acarretando um aumento no desgaste da ferramenta, o que pode comprometer tanto a qualidade do acabamento quanto a durabilidade da ferramenta de corte. Dessa forma, a termografia se mostra como uma ferramenta valiosa para o monitoramento do processo de usinagem, possibilitando ajustes nos parâmetros operacionais para otimizar a vida útil da ferramenta e garantir a precisão e a qualidade do produto final. A utilização desse método contribui para um entendimento mais profundo sobre a relação entre a temperatura e o desgaste na usinagem de materiais desafiadores como o aço inoxidável, abrindo caminho para novas investigações que visem à eficiência e à sustentabilidade no setor de manufatura.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradecemos a Deus, cuja sabedoria e proteção nos acompanharam ao longo de toda esta jornada. Agradecemos às nossas famílias, que sempre nos apoiaram e incentivaram em cada etapa desse processo. Também expressamos nossa gratidão ao SENAI (Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial), que nos proporcionou as condições necessárias para a realização dos experimentos, tornando este trabalho possível, e ao programa de pós-graduação em Engenharia de Processos da UFCG (Universidade Federal de Campina Grande).

REFERÊNCIAS

[1] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5601: Aços Inoxidáveis. Rio de Janeiro, 2024.

[2] DIAS,A.P.; ÁLVARES,J.F.; MELO,P.S. DOMINGUE,B.S.M.; RAYMUNDO,E.A.; RIBEIRO, R.B. Análise de parâmetros de usinagem do aço inox austenítico abnt 304. 67º abm international congress, 2012.

[3] DINIZ, A. E; MARCONDES, F.C; COPPINI, N.L. Tecnologia da usinagem dos materiais. 9. ed. São Paulo: Artliber, 2014.

[4] FERRARESI, D. Usinagem: processos e tecnologias, 2 ed. São Paulo: Érica, 2015

[5] PEREIRAL,V.P.; CÂMARA,L,M.A. Análise da temperatura ótima de corte para o par: metal duro revestido x aço ABNT 1045. Revista matéria. v.26 n. 03, 2021.

[6] PAGOTTO,C.R. Medição da temperatura no torneamento convencional a seco do aço ABNT 1045 através de câmera termográfica. South American Development Society Journal. v. 08 n.24, 2022.

[7] MACHADO, A. R.; ABRÃO A.M.; COELHO, R.T.; DA SILVA, M.B. Teoria da usinagem dos materiais, 1 ed. São Paulo: Edgard Blucher, 397, 2009.

[8] SHAW, M.C. Metal Cutting Priciples, 2 ed. Oxford University Press, 2005.

[9] SILVA, J. L.; SOUZA, A. R. Influência dos Fluídos de Corte na Usinagem: Uma Revisão. *Revista de Engenharia e Tecnologia*, v. 09, n. 01, 2017.

[10] NOGUEIRA, G.F.S.M; BATISTA, M.D; BA, E.C.T; CRUZ, M.P.M; MORAES,L.P.Z.G; NEVES, C.A.S; MARTINS.P.S. Análise da temperatura na interface ferramenta-peça no torneamento do aço 1020 sob diferentes condições de corte, a seco e com fluido. X Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Salvador, 2018.

Capítulo 5

Infiltração de umidade em elementos porosos: fundamentos, modelagem matemática e aplicações em edificações

Bruna Thalita Alexandre Silva[1]
Antonio Gilson Barbosa de Lima[2]

Resumo: A problemática da infiltração de umidade em elementos porosos de edificações emerge como um dos desafios mais críticos e insidiosos na preservação da integridade estrutural e na qualidade ambiental de construções. Esses fenômenos, que afetam diretamente a durabilidade dos materiais e a salubridade dos ambientes, resultam de complexas interações entre fatores como a porosidade intríseca dos materiais, as variações climáticas e a presença de soluções de impermeabilizações inadequadas. Modelar com precisão esses processos é relevante para prever falhas estruturais e implementar intervenções eficazes. Neste contexto, este artigo oferece uma revisão detalhada dos modelos matemáticos aplicados ao estudo do fluxo de umidade em materiais porosos. São analisados modelos clássicos de base física como Green-Ampt, Richards e Philip, além dos empíricos, e semi-empíricos. A revisão enfatiza as diferenças entre os modelos clássicos e contemporâneos, discutindo sua precisão, eficiência computacional, aplicabilidade prática e limitações. Por fim, são discutidos os desafios atuais da modelagem, como a complexidade dos fenômenos higrotérmicos, e propostas futuras para o aprimoramento das metodologias, com foco na maior precisão preditiva e na viabilidade computacional para a engenharia.

Palavras–chave: Inflitração. Materiais porosos. Modelos matemáticos.

[1] Estudante do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – UAEM _ UFCG
[2] Docente/pesquisador do Depto de Engenharia Mecânica – UAEM – UFCG

1. INTRODUÇÃO

A infiltração de umidade em elementos porosos de edificações constitui um dos desafios mais prementes na conservação da integridade estrutural e da qualidade ambiental de construções. Este fenômeno, resultante de interações complexas entre variáveis ambientais e propriedades dos materiais, compromete a durabilidade e a segurança das estruturas. A presença de umidade, frequentemente exacerbada por condições climáticas adversas e pela inadequação dos sistemas de impermeabilização, pode levar à degradação das propriedades físicas e estéticas das edificações (Barbosa *et al*., 2021).

Além das consequências estruturais, a infiltração de umidade desencadeia uma série de problemas secundários que afetam a salubridade dos ambientes internos. A proliferação de mofo e fungos em áreas afetadas por umidade é um dos efeitos mais graves, pois está associada a doenças respiratórias e condições alérgicas, que impactam diretamente a saúde dos ocupantes. Adicionalmente, a umidade prejudica a eficiência energética das edificações, comprometendo a capacidade de isolamento térmico e elevando o consumo de energia para climatização. Assim, a gestão inadequada da umidade não apenas gera problemas de saúde, mas também acarreta custos econômicos significativos para os proprietários e ocupantes (Kamel *et al*., 2024).

A ineficácia de muitos métodos tradicionais de impermeabilização agrava ainda mais essa problemática. Apesar de amplamente utilizados, sistemas como mantas asfálticas e revestimentos superficiais frequentemente falham em proporcionar a proteção necessária ao longo do tempo. A deterioração desses materiais, somada a aplicações inadequadas, contribui para a infiltração progressiva e à necessidade de intervenções constantes, que podem se tornar financeiramente onerosas. Ademais, muitos desses métodos não são projetados para lidar com a umidade interna proveniente de condensação, um fenômeno que se torna cada vez mais comuns em contextos de climas temperados (Magalhães *et al*., 2019).

A complexidade do fenômeno de infiltração de umidade é ainda intensificada por uma variedade de fatores que influenciam sua dinâmica. A porosidade dos materiais, a variação das condições climáticas e a interação entre diferentes camadas de materiais são elementos que, em conjunto, determinam a magnitude e a direção do fluxo de umidade. Cada um desses fatores contribui para um cenário multifatorial que desafia as tentativas de previsão e mitigação dos efeitos da umidade nas edificações. A inter-relação entre as características dos materiais e as condições ambientais torna imperativa a utilização de modelos numéricos e analíticos sofisticados para a compreensão desse fenômeno (Zhao *et al*., 2022).

Nesse contexto, a modelagem matemática da infiltração de umidade se revela uma ferramenta indispensável para profissionais da engenharia. Ao desenvolver modelos que descrevem o comportamento da umidade em materiais porosos, é possível, não apenas prever a evolução da degradação estrutural, mas também planejar intervenções mais eficazes. A modelagem oferece a capacidade de testar diferentes cenários, permitindo a comparação da eficácia de materiais e soluções de impermeabilização sob condições variáveis. Portanto, não se limita a ser uma mera abstração teórica, mas se traduz em uma ferramenta prática e valiosa para a preservação das edificações (Dafico *et al*., 2023).

Entre os modelos clássicos que fundamentam essa análise, destacam-se Green-Ampt, Richards, Philip, Kostiakov, Horton, Holtan e o de Singh e Yu. A conservação da massa, juntamente com a Lei de Darcy, descreve o fluxo de fluidos em meios porosos e estabelece uma base teórica sólida para a compreensão do transporte de água em solos e materiais de construção. No entanto, esses modelos, apesar de fundamentais, apresentam limitações que devem ser cuidadosamente consideradas na aplicação prática.

O avanço da tecnologia tem possibilitado o desenvolvimento de modelos mais sofisticados, que integram o transporte simultâneo de calor e umidade, abordando a interdependência entre esses dois processos em ambientes construídos. A conservação da energia é acoplada, uma vez que a umidade está intrisecamente relacionada à temperatura. Esses modelos avançados permitem simulações mais realistas, levando em conta variáveis como a radiação solar, variações sazonais de temperatura e a dinâmica dos fluxos de ar, oferecendo um entendimento mais abrangente dos fenômenos higrotérmicos em edificações.

A relevância deste estudo se torna clara ao se considerar a urgência em desenvolver soluções eficazes para mitigar os efeitos adversos da infiltração de umidade nas construções. Compreender melhor os mecanismos envolvidos na infiltração são decisivo para a formulação de intervenções que não apenas preservem a integridade das estruturas, mas também garantam a saúde dos ocupantes e a eficiência energética das edificações. A conservação das construções modernas, industriais e também de edificações históricas, sendo essas ultimas mais vulneráveis à infiltração, depende da aplicação de modelos precisos que considerem suas características específicas.

O presente capítulo tem com objetivo apresentar uma revisão de maneira abrangente dos modelos matemáticos que tratam do fluxo de umidade em materiais porosos, englobando tanto os modelos clássicos quanto os mais recentes avanços na área. Busca-se comparar as diferentes abordagens, analisando suas limitações e aplicabilidades em contextos reais, contribuindo assim para um entendimento mais profundo do estado da arte no campo da modelagem da infiltração de umidade.

Em síntese, a infiltração de umidade permanece como um desafio técnico de grande magnitude, e a modelagem desponta como uma ferramenta para o desenvolvimento de soluções práticas eficientes. Este estudo pretende não apenas revisar os modelos existentes, mas também indicar direções futuras para aprimoramentos metodológicos, que possam proporcionar maior precisão preditiva e eficiência computacional, contribuindo de maneira significativa para a conservação das edificações e a otimização dos recursos disponíveis na engenharia.

2. FUNDAMENTOS DO FLUXO DE UMIDADE EM MATERIAIS POROSOS

2.1. ELEMENTOS POROSOS

Nas construções modernas e tradicionais, materiais porosos são amplamente empregados em diversas camadas e componentes, como em argamassas, concretos, tijolos, revestimentos e pedras naturais. Esses elementos constituem a base de diversas infraestruturas, proporcionando suporte, isolamento térmico e acústico, além de moldar a interação dos edifícios com o ambiente externo. No entanto, sua estrutura interna composta por poros é o que define a complexidade de seu comportamento diante de agentes externos (Fang *et al.*, 2021).

Um meio poroso pode ser amplamente definido como um material cuja estrutura interna é permeada por uma rede de poros interconectados ou não, que são espaços vazios onde fluidos, como o ar e a água, para este caso, podem se infiltrar e circular. Essa definição abarca uma vasta gama de materiais, naturais e artificiais, e a estruturas dos poros pode variar amplamente em termos de tamanho, forma e conectividade. A dinâmica dos fluidos em um meio poroso é determinada pelas características desse meio, e a sua capacidade de absorver, armazenar ou transferir fluidos depende da sua porosidade, permeabilidade e da forma como seus poros estão conectados (Strangfeld, 2020).

A porosidade, que quantifica a fração do volume total do material que é ocupada por espaços vazios, é um conceito central para a compreensão do comportamento dos meios porosos. No entanto, sozinha, a porosidade não define a permeabilidade, que é a propriedade que mede a facilidade com que um fluido pode atravessar o material. A permeabilidade depende, em grande parte, da conectividade dos poros, ou seja, de como esses espaços vazios estão interligados entre si. Um material pode ter alta porosidade, mas se os poros não estiverem bem conectados, sua permeabilidade será limitada. Estudos como o de Armstrong *et al*. (2019) demonstram que essa inter-relação entre porosidade e conectividade é determinante para prever a eficiência de materiais poros na condução de fluidos.

Pesquisas empíricas fornecem dados valiosos sobre como esses conceitos se manifestam em contextos reais. Quando aplicados à construção civil, os materiais porosos têm comportamentos diferenciados que precisam ser entendidos para prever sua durabilidade e funcionalidade em edificações. Antón *et al.* (2024) abordaram a corrosão em estruturas de concreto reforçado, revelando que a umidade excessiva e a alta permeabilidade levam ao início precoce da corrosão das armaduras.

O estudo de Ammar *et al.* (2024) investigou a permeabilidade em blocos de concreto com a adição de aditivos cristalinos, revelando que eles aumentam a resistência à compressão, e reduz significativamente a permeabilidade e a absorção de água, contribuindo para uma estrutura mais densa e durável. Já o trabalho de Hung *et al.* (2021) analisou a conectividade em concreto permeável, demonstrando que o aumento de agregados reciclados eleva a porosidade, mas também intensifica a capacidade de drenagem, o que pode ser benéfico para aplicações em sistemas de pavimentação permeável.

2.2. MECANISMOS DE TRANSPORTE DE UMIDADE

A umidade em materiais porosos exibe um comportamento diversificado, refletindo as complexidades inerentes à física dos fluidos. Sua interação com esses materiais envolve mecanismos complexos de absorção, armazenamento e transmissão, influenciados por diversos fatores, como tensão superficial, capilaridade e condições ambientais externas. A movimentação da umidade é frequentemente impulsionada por gradientes de pressão e concentração, resultando em fluxos que podem ser difíceis de prever. O estudo dessas interações se torna ainda mais pertinente quando se considera os impactos que a umidade pode ter nos materiais de construção civil (Xue et al., 2022).

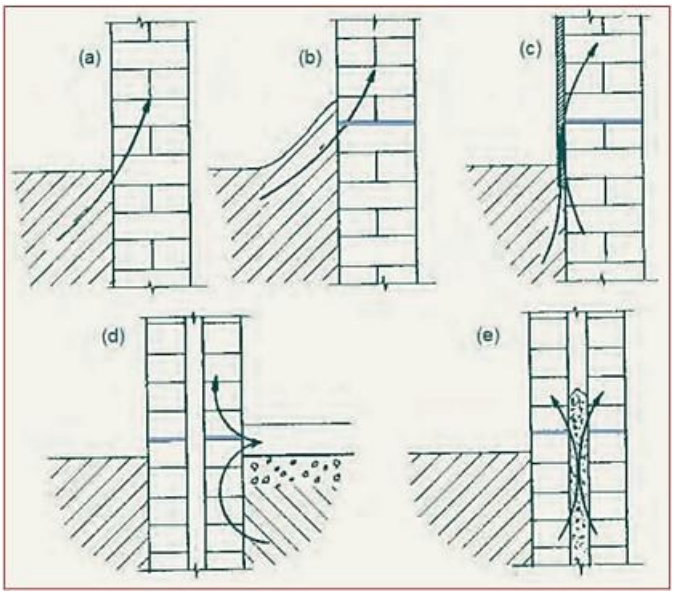
Um dos principais mecanismos de transporte de umidade em meios porosos, a difusão, pode ser definida como o movimento de moléculas de água através dos poros de um material, resultante de gradientes de concentração, por exemplo. Este processo ocorre de regiões com maior concentração de vapor de água para regiões com menor concentração, e está intimamente relacionado às propriedades dos materiais, como a permeabilidade ao vapor (Morais *et al*., 2021). Zhou *et al*. (2023) analisaram o coeficiente de difusão de umidade no concreto em diferentes condições e verificaram que este parâmetro é afetado por fatores como a porosidade e o ambiente externo, influenciando a absorção de água em longo prazo.

Outro processo relevante é a absorção capilar, que pode ser descrita como o movimento ascendente da água em materiais porosos devido à ação da capilaridade. Esse fenômeno ocorre em razão da interação entre as forças adesivas (entre a água e as paredes dos poros) e coesivas (entre as próprias moléculas de água), que impulsionam o fluido através dos poros do material (Wang *et al*., 2021a). Long *et al.* (2024) propuseram um estudo com a aplicação da Ressonância Magnética Nuclear (NMR) revelando que essa técnica pode quantificar, com precisão, o coeficiente de absorção capilar em materiais porosos, identificando, também, os padrões de transporte de água, demonstrando ser eficaz para entender a durabilidade e a resistência de materiais expostos a umidade. Na Figura 1 está ilustrada essa fenomenologia da absorção capilar em ação.

A condensação, outro mecanismo de transporte de umidade, ocorre quando o vapor de água presente no ar se transforma em líquido ao entrar em contato com superfícies mais frias. Em meios porosos, a condensação pode ocorrer no interior dos poros, resultando em acúmulo de umidade que pode prejudicar a integridade dos materiais (Fedorik e Niemi, 2024). Estudos como o de Oliveira e Nunes (2020) mostram que a condensação dentro de materiais porosos, como em materiais de revestimento, pode levar a uma aceleração dos processos de degradação, além de contribuir para o desenvolvimento de fungos e mofo em superfícies internas.

A correlação entre difusão, absorção capilar e condensação pode ser observada na forma como a umidade migra e interage com os materiais porosos. Difusão e absorção capilar habitualmente ocorrem simultaneamente em contextos reais, com a difusão de vapor facilitando a absorção de água líquida, enquanto a condensação, ao criar acúmulos de água dentro dos poros, pode intensificar os efeitos da capilaridade. A complexidade desses processos foi demonstrada no trabalho de Xue *et al.* (2022), onde os três mecanismos foram analisados em conjunto em estruturas de edifícios, destacando os desafios de preservação frente a variações de umidade.

Figura 1 – Umidade ascendente em uma parede: (a) terra encostada na parede; (b) terra acima da impermeabilização; (c) transmissão pelo revestimento; (d) transmissão pelo contrapiso; (e) transmissão por entulho depositado no vão de parede dupla. Fonte: Câmara Brasileira da Indústria da Construção (2013)



3. CONDIÇÕES AMBIENTAIS

Para compreender o comportamento da umidade em elementos porosos de edificações, é necessária uma análise da influência das condições ambientais. A variabilidade dessas condições externas determina como a umidade se movimenta, se acumula ou evapora dos materiais que compõem as estruturas, e essa dinâmica ocorre com mais intensidade em ambientes que experimentam freqüentes mudanças climáticas ou zonas com alta incidência de precipitações (Netto *et al*., 2022).

Um dos fatores preponderantes que afetam o comportamento da umidade em materiais porosos é a umidade relativa do ar, que regula diretamente o equilíbrio higroscópico desses materiais. A umidade relativa do ar (URA) é definida como a razão entre a pressão de vapor d'água presente no ar e a pressão de vapor saturada no ar a uma dada temperatura, expressa em porcentagem. Esse parâmetro ambiental é decisivo porque, ao se modificar, altera o potencial de absorção ou liberação de umidade pelos materiais porosos, na busca de um estado de equilíbrio com as condições atmosféricas. Materiais porosos, como tijolos, argamassas e concretos, respondem dinamicamente a essas variações, aumentando ou diminuindo sua umidade interna de acordo com o nível de URA. Quando a umidade relativa excede certos níveis críticos, especialmente acima de 80%, observa-se um incremento substancial na penetração de umidade nos poros, levando à saturação (Zhou *et al*., 2023).

A variação de temperatura também é um aspecto ambiental relevante. Temperaturas mais altas aumentam a taxa de evaporação da água dos materiais, enquanto temperaturas mais baixas, especialmente quando associadas à condensação, promovem a retenção de umidade. Além disso, o gradiente de temperatura entre o interior e o exterior das edificações pode induzir fluxos de umidade em direção às zonas mais frias, intensificando processos de deterioração (Zhang *et al*., 2021).

Os gradientes de pressão constituem uma das condições ambientais mais influentes neste fenômeno. Esses gradientes podem ser definidos como as variações na pressão que atuam sobre a umidade, afetando sua movimentação através dos poros. Três componentes principais configuram esses gradientes: a pressão capilar, que se relaciona à tensão superficial da água nos poros; a pressão gravitacional que decorre da força da gravidade e afeta o movimento da água em direção a áreas de menor altura; e a pressão de vapor, que é a pressão exercida pelo vapor d'água em um espaço fechado. Cada um desses tipos de pressão contribui para a complexidade do movimento da umidade, que dificilmente se comporta de forma linear ou previsível (Islahuddin, Janssen, 2019).

Ainda citando os fatores ambientais, tem-se a precipitação. A exposição contínua ou intermitente à chuva pode saturar completamente os materiais porosos. O impacto da precipitação nas edificações varia de acordo com a capacidade de drenagem dos materiais e a presença de barreiras impermeáveis. Neste sentido, estratégias eficientes devem ser levadas em consideração para evitar o acúmulo de umidade nas superfícies das construções (Kamel *et al.*, 2024).

Ao relacionar esses fenômenos, observa-se que as condições ambientais não atuam de maneira isolada. Pelo contrário, esses fatores, quando combinados, criam cenários complexos de transporte de umidade que requerem uma abordagem ampliada para mitigação. As estratégias de controle de umidade devem considerar também o ambiente onde as edificações estão inseridas, de forma a antecipar os desafios que possam surgir em diferentes contextos climáticos.

4. MEDIDAS DE CONTROLE

O gerenciamento eficaz da umidade não se restringe apenas à proteção das superfícies, mas abrange uma abordagem holística que integra técnicas de construção, seleção de materiais e práticas de manutenção. Esse enfoque proativo busca não apenas evitar a infiltração, mas também assegurar que os ambientes internos mantenham condições adequadas de salubridade e conforto.

Diversos métodos de impermeabilização são empregados na construção civil, sendo a norma NBR 9575 um marco regulatório que orienta a aplicação desses processos. Esta norma estabelece critérios técnicos e especificações para a impermeabilização de edificações, contemplando desde áreas expostas a intempéries até ambientes internos sujeitos à umidade. Os tipos de impermeabilização variam entre as soluções rígidas (não possuem propriedades de flexibilidade adequadas às partes de construção sujeitas a movimentação) e flexíveis.

Dentre os materiais impermeabilizantes, tem-se o concreto impermeável, que incorpora aditivos que reduzem a porosidade; a argamassa polimérica, que confere flexibilidade e resistência à água; a manta asfáltica, amplamente utilizada em coberturas, e as mantas líquidas, que se aplicam como um filme contínuo sobre a superfície. O rejuntamento e a calafetagem são também práticas comuns que visam selar interstícios e juntas, prevenindo a entrada de umidade. A eficácia desses materiais depende, no entanto, de sua correta aplicação e da compatibilidade com os substratos (Batista *et al*., 2024).

Além das soluções de impermeabilização, métodos de precaução desempenham um papel significativo no controle da umidade. A instalação de drenos adequados, a ventilação eficaz de ambientes e a realização de cortes nos materiais são estratégias que visam minimizar o acúmulo de água e promover a secagem natural das superfícies. Tais

métodos devem ser parte integrante do planejamento inicial de qualquer edificação, considerando as especificidades do local e as condições climáticas predominantes (Fernandes *et al.* 2022).

Entretanto, a ineficácia de métodos tradicionais de impermeabilização é uma questão recorrente. Problemas surgem frequentemente em decorrência de aplicações inadequadas, como a falta de preparação das superfícies ou a utilização de materiais inadequados para as condições específicas do ambiente. Essas falhas não apenas comprometem a eficácia da impermeabilização, mas também acarretam custos adicionais e danos significativos ao longo do tempo (Barroso *et al.*, 2015).

Estudos de casos reais têm revelado a importância de uma abordagem crítica em relação aos métodos de controle de umidade (Panico *et al.*, 2023). Em diversas edificações, a análise de falhas em sistemas de impermeabilização levou a uma reavaliação das práticas convencionais, indicando a necessidade de inovação e adaptação. Estudos em edificações históricas têm demonstrado que, apesar da aplicação de técnicas de impermeabilização tradicionais, a presença contínua de umidade e os efeitos nocivos persistem (TORRES, 2018).

5. MODELOS MATEMÁTICOS CLÁSSICOS

As categorias de modelagem matemática referentes à infiltração de água podem ser divididas, segundo a EPA (1998), naqueles de base física e puramente empíricas. Os modelos de base física são derivados da lei de conservação de massa e da lei de Darcy (1856), destacando-se os modelos físicos de Green-Ampt (1911), Richards (1931) e Philip (1957). Os empíricos são fundamentados em dados coletados em campo e experimentos de laboratório, destacando-se os de Kostiakov (1932) e Horton (1941).

6. MODELOS DE BASE FÍSICA

6.1. MODELO DE GREEN-AMPT

Em 1911, a partir da equação elaborada por Darcy, A. E. Green e H. H. Ampt desenvolveram um modelo frequentemente utilizado para estimar a taxa de infiltração em meios porosos não saturados. A equação parte do pressuposto de que a infiltração ocorre inicialmente por fluxo gravitacional nos poros, seguida por capilaridade quando a água alcança certa profundidade no meio, e é expressa como:

$$I = \frac{K_S}{\phi}\,\psi + \frac{h}{\alpha} \qquad (1)$$

onde:

I é a taxa de infiltração inicial;

K_S a condutividade hidráulica;

ψ o potencial de sucção;

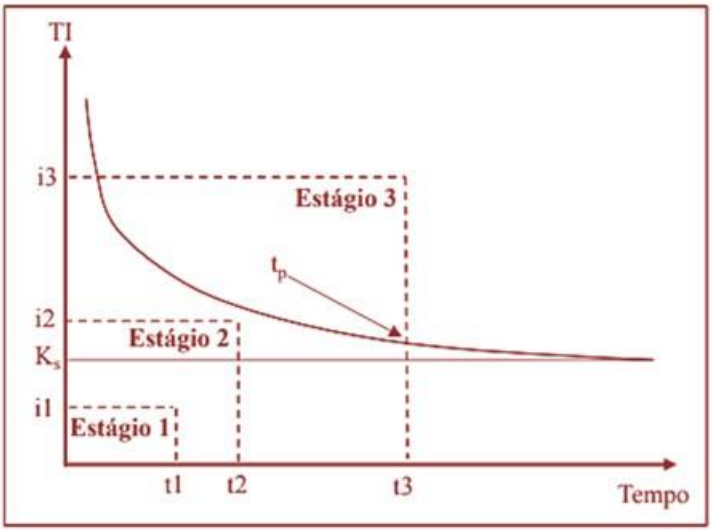
h a altura capilar efetiva; e

α o fator formação de molhamento.

Bouwer (1969) demonstrou como o modelo é eficaz para prever infiltração em solos com camadas homogêneas e pouca variabilidade de umidade. Em continuação Mein

e Larson (1973), modificaram a equação proposta por Green-Ampt, integrando-a ao longo da duração da chuva. O modelo Green-Ampt modificado por Mein e Larson, calcula o total de infiltração considerando tanto a intensidade quanto a duração da precipitação. Conforme pode ser observado na Figura 2, os autores consideram que a infiltração apresentam três estágios.

Figura 2 – Representação dos três estágios de infiltração de acordo com Mein e Larson (1973).



Fonte: Failage (2018)

O estágio 1 indica que a intensidade i é menor que K_s, portanto não há geração de escoamento e toda a precipitação se infiltrará. No estágio 2, a intensidade da chuva é menor que a T_i e maior que s, ou seja, toda a água infiltra o solo e aumenta o teor de umidade. No estágio 3, quando a intensidade da chuva excede a taxa de infiltração e a condutividade hidráulica, ocorre o escoamente superficial. À medida que o modelo progride para o terceiro estágio, há um ponto em que o solo satura, conhecido como tempo de empoçamento, e é determinado pela equação 2:

$$t_p = \frac{f_c - f_0}{I - f_c} \cdot t \qquad (2)$$

onde:

f_c é a capacidade de infiltração do solo;

f_0 a taxa de infiltração inicial;

I a intensidade da chuva; e

t a duração da chuva.

Dentre as limitações, além das simplificações em relação à heterogeneidade do solo, ou seja, o modelo de Green-Ampt pressupõe, como visto, que o solo seja homogêneo, também assume uma frente de infiltração bem definida entre a camada saturada e a não saturada, o que pode ser uma suposição inadequada em solos com variações bruscas de umidade ao longo do perfil. Estudos de Smith et al. (2002) sugerem que o modelo de

Green-Ampt tem dificuldades em capturar variações rápidas de umidade no meio, especialmente em climas áridos.

Deng e Zhu (2016) analisaram a adaptação de parâmetros hidráulicos do modelo de Green-Ampt para infiltração de água em solos com camadas verticais heterogêneas. Devido aos desafios da aplicação do modelo em solos heterogêneos, os autores propuseram o uso de parâmetros efetivos que representassem o comportamento de infiltração, mesmo em solos com múltiplas camadas. O estudo sugere o uso da média harmônica para a condutividade hidráulica e da média de ordem p para a sucção na frente de umedecimento como um esquema geral de escalonamento, principalmente quando o número de camadas é elevado, situação em que tendem a se comportar como um meio homogêneo.

Liu *et al*. (2021) descreveram um novo modelo Green-Ampt, que incorpora derivadas fracionárias, para analisar a infiltração de água em encostas e a estabilidade durante a chuva. A infiltração foi modelada em duas etapas: uma fase inicial controlada pela intensidade da chuva e uma fase posterior, determinada pelo coeficiente de permeabilidade. O novo modelo expande o modelo clássico de Green-Ampt para incluir a variação dinâmica da frente de umedecimento e a complexidade dos solos inclinados, oferecendo maior precisão em terrenos heterogêneos e inclinados.

Huang *et al.* (2024) apresentaram cinco modelos modificados de Green-Ampt (MGAM), em seu estudo, cada um empregando uma fórmula diferente para o ângulo de contato dinâmico: as leis de potência, Jiang, Hoffman, Cox-Voinov, e uma aproximação linear. Os autores realizaram experimentos de infiltração em colunas de areia e compararam os resultados com esses modelos.

Os resultados mostraram que todos os modelos modificados superaram o modelo clássico de Green-Ampt em termos de erro quadrático médio, na descrição da pressão de sucção em equilíbrio, que se mostrou mais precisa nos modelos MGAM. Dentre os modelos testados, o modelo MGAM-Hoff apresentou a menor variação nos parâmetros de ajuste, mas requereu mais parâmetros que os demais modelos. O modelo linear, MGAM-LN, demonstrou eficiência por ter uma solução analítica e menor número de parâmetros de ajuste.

O estudo conclui que a inclusão da pressão de sucção dinâmica aprimora significativamente a modelagem da infiltração, recomendando o uso desses modelos modificados para simular processos de infiltração com maior precisão. Além disso, destaca a influência do comprimento dos dados e do atraso temporal nas medições sobre a otimização da pressão de sucção em equilíbrio, sugerindo que a precisão pode ser afetada pelo tempo e extensão das medições.

7. EQUAÇÃO DE RICHARDS

Em 1928, Richards estabeleceu as bases teóricas para descrever a percolação da água em um meio poroso não saturado, baseando-se nos princípios de Buckingham, dando continuidade a esse trabalho em 1931, em um momento em que a compreensão do fluxo de água em solos estava em franca evolução. Philip Richards, um agrônomo de renome, buscava descrever a dinâmica do movimento da água em meio poroso, considerando não apenas a gravidade, mas também as forças capilares que atuam nos materiais. Sua pesquisa foi motivada por questões agronômicas, principalmente a

irrigação e a drenagem, áreas críticas para a produção agrícola e a gestão dos recursos hídricos.

O estudo que culminou na formulação da equação de Richards visava integrar os conceitos de movimento de fluidos e a variabilidade das propriedades do solo. Richards reconheceu que a água de comporta de maneira complexa ao passar por meios porosos, e que essa dinâmica era influenciada por variáveis como a umidade do solo, a pressão e a estrutura do material. A sua equação é expressa como uma equação diferencial que relaciona a taxa de mudança da umidade do solo com a pressão e a condutividade hidráulica, sendo:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \nabla \cdot (K(\theta) \cdot \nabla \psi) \qquad (3)$$

onde:

θ é a umidade volumétrica do solo;

$K(\theta)$ é a condutividade hidráulica; e

ψ a pressão da água.

O experimento original de Richards envolveu a medição do movimento da água em um meio saturado e não saturado, demonstrando como a pressão e a umidade interagem para afetar o fluxo. A partir de então, os avanços de Richards na modelagem do movimento da água em meios porosos não saturados abriram caminhos para uma compreensão mais profunda nos processos hidrológicos em uma variedade de contextos. Failache (2018) apresenta alguns dos principais modelos que foram desenvolvidos a partir da equação de Richards, baseada em listas levantadas pela EPA (1998), Turner (2006) e Sonaje (2013), demonstrada na Tabela 1.

Tabela 1 – Modelos de infiltração-escoamento desenvolvidos a partir da equação de Richards.

Autor	Equação	Parâmetros
Knight (1973)	$Y = \frac{\pi}{4} \ln \left[1 + \text{erf} \left(\frac{4T}{\pi} \right)^{1/2} \right] + T$	**erf** é uma função de erro que descreve a difusão, usada para calcular a distribuição normal.
Parlange (1975)	$2Y - \left[1 - \exp \left(-2T^{1/2} \right) \right] = 2T$	-
Brutsaert (1977)	$Y = T + \left[\frac{T^{1/2}}{1 + \alpha T^{1/2}} \right]$	α é uma constante que varia entre 2/3 e 1.
Collis-George (1977)	$Y = T + \frac{1}{N} \left[1 - \exp \left(-\alpha T^{1/2} \right) \right]$	N é uma constante adimensional que varia entre 1 e 4.
Schuwartzendruber e Clauger (1989)	$Y = T + \frac{1}{\alpha} \left[1 - \exp \left(\alpha T^{1/2} \right) \right]$	α é uma constante relacionada aos parâmetros hidráulicos do solo.

Fonte: Adaptado de Failache (2018)

As aplicações da equação de Richards, com os diversos trabalhos apresentados, representam uma contribuição significativa para o campo de estudo, além de apresentar ferramentas adicionais para a estimativa e a validação dos modelos. No entanto suas limitações merecem consideração. Sua aplicabilidade é frequentemente restrita a condições em que o meio é homogêneo e isotrópico, enquanto a realidade dos sistemas naturais é muitas vezes complexa e heterogênea. Além disso, em situações de fluxos rápidos ou em meios muitos secos, a equação pode não captar adequadamente a dinâmica do fluxo de água, exigindo ajustes ou o uso de modelos alternativos.

8. EQUAÇÃO DE PHILIP

A descoberta de infiltração de John Robert Philip foi introduzida em 1957 e se tornou um dos modelos mais importantes para descrever a infiltração de fluidos em meios porosos. Essa pesquisa surgiu da necessidade crescente de compreender as habilidades de infiltração em sistemas que envolvem solos e materiais heterogêneos, e abordou a solução da equação de Richards, oferecendo uma forma semi-analítica de descrever a infiltração de água em solos sob condições não saturadas. O trabalho de Philip se destacou por propor uma solução semi-analítica para o problema da infiltração, e oferecendo um método mais acessível para prever o fluxo de água não só sob a influência de gravidade e capilaridade.

A pesquisa baseou-se em experimentos controlados que avaliaram a infiltração de água em colunas de solo, resultando em um modelo que descreve a infiltração inicial, governada pela capilaridade, e o regime final, dominado pela gravidade. O modelo descreve, de forma aproximada, uma infiltração desde o tempo inicial até um regime estável, com base em coeficientes empíricos obtidos experimentalmente. A fórmula geral pode ser expressa como:

$$I(t) = St^{1/2} + At \qquad (4)$$

onde:

$I(t)$ é a infiltração acumulada no tempo t;

S é o coeficiente de sorptividade, relacionado à capacidade do meio de absorver água por capilaridade;

A é a condutividade hidráulica do meio em regime permanente.

Wang et al. (2017) exploraram o uso de informações isotópicas (relativo a isótopos) e hidrológicas para melhorar a previsão de parâmetros no modelo de infiltração de Philip. O método se mostrou eficaz em prever as variações isotópicas da água de infiltração, indicando que a combinação de dados melhorou a precisão dos parâmetros, demonstrando o potencial da modelagem utilizando a equação de Philip.

Tashayo *et al.* (2020) realizaram um estudo que envolveu a coleta de dados de infiltração em noventa e dois pontos no local analisado, juntamente com informações sobre a profundidade do solo e variáveis ambientais obtidas por meio de modelos digitais de elevação e sensoriamento remoto. Como resultados, a adição de dados ambientais como índice de vegetação e atributos topográficos, melhorou significativamente a precisão. Ainda pode ser observado que a variação de parâmetros como elevação, declividade e índice de umidade do solo influencia diretamente a infiltração e a distribuição de matéria orgânica.

A pesquisa de Philip teve um impacto específico nos estudos subseqüentes, fornecendo uma base teórica para o desenvolvimento de modelos mais complexos. Sua simplicidade relativa e aplicabilidade em contextos de engenharia e hidrologia permitiram que ela fosse amplamente utilizada e adaptada para uma série de condições de fluxo. Sua pesquisa presume que o meio poroso seja homogêneo e isotrópico, o que restringe sua precisão em cenários mais complexos, como em solos estratificados ou materiais de construção com porosidade heterogênea.

9. MODELOS EMPÍRICOS

9.1. EQUAÇÃO DE KOSTIAKOV

O modelo de Kostiakov, formulado em 1932 por Alexei Nikolaevick Kostiakov, engenheiro e hidrólogo russo, tornou-se um dos principais modelos empíricos para descrever a infiltração em solos e materiais porosos. Esse modelo surgiu em um contexto de necessidade prática de prever a infiltração de água em solos agrícolas, especialmente em sistemas de irrigação e manejo de recursos hídricos. Kostiakov desenvolveu uma equação empírica baseada em observações experimentais de infiltração, levando em conta a diminuição da taxa de infiltração ao longo do tempo.

A pesquisa foi motivada pela dificuldade de aplicar modelos teóricos mais complexos, como os baseados na equação de Darcy ou na equação de Richards, a situações práticas de campo. O modelo de Kostiakov, segue a forma geral:

$$I(t) = kt^a \qquad (5)$$

onde:

$I(t)$ é a infiltração acumulada em função do tempo t;

k é um coeficiente de infiltração (obtido experimentalmente); e

a é um expoente que descreve a taxa de diminuição da infiltração ao longo do tempo.

Esse modelo tem uma aplicabilidade prática extensa, especialmente em estudos de irrigação, onde o controle da quantidade de água infiltrada é preciso para o manejo eficiente dos recursos hídricos e para evitar desperdício.

Zakwan *et al*. (2016) testaram três modelos de infiltração (Kostiakov, Horton e Philip) e compararam métodos convencionais de ajuste gráfico com o uso do GRG Solver, uma ferramenta de otimização não linear disponível no Excel. Dados de infiltração de solos argilo-arenosos da Nigéria, foram utilizados para avaliar o desempenho dos métodos.

A comparação dos métodos mostrou que o GRG Solver oferece maior precisão na estimativa dos parâmetros de infiltração em relação ao método gráfico, reduzindo o erro quadrático médio em cerca de 25% para ao modelos de Kostiakov e Horton e em 22% para o modelo de Philip. Entre os modelos testados, o de Kostiakov apresentou melhor desempenho geral, ajustando-se mais precisamente aos dados observados em todos os sete locais estudados.

No trabalho de Castañeda-miranda *et al.* (2019), o modelo combinado Kostiakov-Lewis foi aplicado para estimar a infiltração acumulada e a profundidade ao longo do tempo em parcelas agrícolas. O estudo oferece solução eficiente, mas por ser empírico, a

sua precisão depende fortemente dos dados experimentais e das condições específicas de cada solo. Além disso, ele não leva em consideração fenômenos como a capilaridade ou a variabilidade da porosidade em meios heterogêneos. Em solos com características mais complexas, como os estratificados ou compactados, o modelo pode gerar estimativas imprecisas.

9.2. EQUAÇÃO DE HORTON

Em 1941, Robert Elmer Horton, um hidrólogo norte-americano, desenvolveu um modelo com o objetivo de explicar a variação da taxa de infiltração, partindo da observação de que essa taxa decresce exponencialmente ao longo do tempo após o início de um evento de precipitação.

A motivação por trás do estudo de Horton era a necessidade de um modelo que explicasse de maneira mais acessível o comportamento da infiltração, especialmente em solos não saturados, onde a variabilidade temporal desempenha um papel significativo. Antes do modelo de Horton, muitos estudos de infiltração se concentravam em situações mais simples, sem capturar adequadamente o comportamento dinâmico observado em ambientes naturais. Com base em extensos estudos de campo, Horton propôs que a taxa de infiltração diminui com o tempo devido ao preenchimento dos poros e à saturação progressiva da camada superficial. Sua equação é expressa como:

$$f(t) = f_c + (f_0 - f_c)e^{-kt} \qquad (6)$$

onde:

$f(t)$ é a taxa de infiltração em um tempo t;

f_0 é a taxa de infiltração inicial;

f_c é a taxa de infiltração de equilíbrio (após o meio saturar); e

k é uma constante de decaimento, que varia conforme o tipo do meio e suas condições.

Wang e Chu (2020) identificaram, em versões anteriores do modelo de Horton, dificuldades para simular infiltrações em períodos prolongados de seca. Assim, esses autores desenvolveram um método de equações não lineares para solos úmidos e equações lineares para solos secos, garantindo previsões mais precisas ao longo do tempo em três tipos de solo sob diferentes condições de chuva.

Esse modelo encontrou uma ampla gama de aplicações, especialmente em estudos de escoamento superficial e controle de enchentes, ajudando a modelar a dinâmica de sistemas de drenagem e a projetar infraestrutura para lidar com grandes volumes de precipitação. Sua aplicabilidade estende-se ao planejamento agrícola, onde a taxa de infiltração é um fator essencial para o manejo adequado da irrigação e para prevenir a erosão do solo.

Por outro lado, os autores notaram que o modelo ainda enfrenta desafios, sendo uma das críticas mais freqüentes do modelo de Horton, a que equação presume uma diminuição exponencial contínua da taxa de infiltração, o que pode não refletir com precisão o comportamento de solos heterogêneos ou compactados, onde a infiltração pode ocorrer de maneira mais complexa. Além disso, o modelo não leva em consideração

fatores como a redistribuição interna de água no solo, o que limita sua precisão em situações onde a estrutura do solo varia significativamente ao longo do tempo.

10. MODELOS AVANÇADOS DE INFILTRAÇÃO

10.1. MODELOS ACOPLADOS DE TRANSPORTE DE CALOR E UMIDADE

A compreensão do transporte simultâneo de calor e umidade em materiais porosos tem sido objeto de investigação desde meados do século XX (Tsay *et al.*, 2006; Roppel *et al*., 2007; Tariku *et al*., 2010). O impulso para tais investigações surgiu da necessidade de aprimorar as previsões sobre o desempenho de edificações e materiais em contextos onde a umidade e a temperatura variam amplamente. A degradação dos materiais de construção, a proliferação de fungos e o conforto térmico dos ocupantes são preocupações centrais que motivaram a pesquisa.

Abdykarim *et al.* (2019) propuseram a investigação de métodos numéricos inovadores para a simulação do transporte acoplado de calor e umidade em materiais porosos. O principal objetivo foi avaliar a eficácia de métodos que poderiam melhorar a eficiência e precisão das simulações de longo prazo, como o método Super-Time-Stepping (STS), em comparação com abordagens tradicionais como o método explícito de Euler. O Super-Time-Stepping (STS) é uma técnica numérica avançada utilizada para acelerar a resolução de equações diferenciais parciais, particularmente em problemas onde métodos explícitos convencionais enfrentam limitações de estabilidade.

O estudo partiu da observação de que as configurações experimentais para prever o comportamento de materiais de construção em horizontes de longo prazo são custosas e complexas, necessitando de testes por anos. Com isso, o artigo propôs o uso do método STS, que permite soluções com intervalos de tempo maiores do que os métodos explícitos tradicionais, reduzindo significativamente o custo computacional. A eficiência do método foi avaliada para dois estudos de caso. O primeiro caso considerou um problema linear, sendo usado para confirmar a compreensão teórica dos métodos numéricos, particularmente para relaxar os limites de estabilidade do esquema. O segundo estudo de caso lidou com uma abordagem mais realista, incluindo propriedades de materiais variáveis e não lineares.

As previsões numéricas foram comparadas com observações experimentais de teor de umidade e temperatura obtidas em trabalhos anteriores, cujos dados foram coletados por aproximadamente 14 meses, incorporando essas observações no modelo proposto. As previsões do modelo físico com os modelos numéricos propostos mostraram concordância satisfatória com as observações experimentais. Mas, embora o método tenha demonstrado eficiência superior ao método de Euler, a aplicação em sistemas com alta não linearidade ainda apresenta desafios, principalmente no que diz respeito à necessidade de refinamento da malha de cálculo e ao tratamento de instabilidades numéricas em casos mais complexos. Além disso, o método ainda carece de testes mais amplos em outras geometrias e condições de fronteiras.

Berger *et al.* (2019) estudaram um modelo numérico explícito inovador para a simulação acoplada de transferência de calor, ar e umidade em materiais de construção porosos. O modelo proposto combina três abordagens numéricas, sendo elas: esquema DU FORT-FRANKEL para resolver a equação de difusão, proporcionando uma maior estabilidade; esquema SCHARFETTER-GUMMEL para a discretização espacial das equações de advecção-difusão; e o método de dois passos de RUNGE-KUTTA para a

discretização temporal, ampliando ainda mais a região de estabilidade. Essas técnicas foram aplicadas em um sistema de duas equações de advecção-difusão acopladas com uma equação puramente difusiva, a fim de relaxar as condições de estabilidade. O modelo foi avaliado em três estudos de caso: um problema quase linear, uma solução analítica para um problema fracamente não linear, e um caso mais realista com coeficientes não lineares e condições de contorno do tipo Robin. Um caso de validação foi considerado para avaliar a eficiência do modelo para um problema não linear. Os resultados destacam uma solução muito precisa computada cerca de 16 vezes mais rápido do que as abordagens padrão.

Apesar da eficiência, o modelo proposto por Berger *et al.* (2019) enfrenta desafios quando aplicado a sistemas com alta não linearidade, onde as instabilidades numéricas ainda podem surgir. Além disso, embora o modelo relaxe a condição de estabilidade em comparação com métodos tradicionais, ele ainda requer uma malha de cálculo adequada e parâmetros bem calibrados para evitar problemas em situações mais complexas. As simulações também podem exigir dados experimentais precisos, o que pode limitar a aplicabilidade em ambientes com pouca disponibilidade de dados.

Mello *et al*. (2019) desenvolveram um modelo numérico para simular a transferência acoplada de calor e umidade em elementos porosos de edificações, como tijolos e paredes com cavidades. O estudo introduziu um modelo CFD-HAM (Heat, Air and Moisture), utilizando o software ANSYS Fluent para simular a interação entre o fluxo de ar, calor e umidade em elementos de construção porosos. A pesquisa comparou simulações unidimensionais e bidimensionais de transferência de calor e umidade, destacando os benefícios de uma abordagem multidimensional. A metodologia foi baseada em equações de conservação de energia e umidade, sendo o modelo aplicado a uma simulação de uma parede composta de tijolo vazado e revestimento, onde os fluxos de calor e umidade foram analisados tanto em 1D quanto em 2D. A simulação bidimensional apresentou resultados mais detalhados e precisos, especialmente nas regiões com fluxo de ar, onde a convecção foi modelada utilizando as equações de Navier-Stokes. Os experimentos foram validados com dados disponíveis na literatura, e destaca a eficácia do modelo para simular fenômenos complexos de transferência de calor e umidade em edifícios.

O modelo CFD-HAM oferece uma análise detalhada e precisa, no entanto o seu tempo de processamento computacional é uma preocupação significativa, especialmente para simulações de longo prazo ou de edificações inteiras. Além disso, o custo computacional de modelar a convecção do ar e o acoplamento com superfícies porosas pode limitar a aplicabilidade do modelo em análises práticas do dia a dia. O artigo sugere que mais pesquisas sejam realizadas para reduzir o tempo de processamento e otimizar o desempenho computacional do modelo para aplicações em larga escala.

Dong *et al*. (2020) examinaram modelos higrotérmicos dinâmicos, com foco em simular a transferência acoplada de calor e umidade em materiais porosos usados em edificações. A pesquisa valida dois modelos amplamente utilizados, o modelo de Kunzel e o modelo de Liu, comparando-os com soluções analíticas, outros modelos simulados e dados experimentais, avaliando assim a precisão para prever o comportamento higrotérmico de edificações, prevenindo o crescimento de mofo e garantindo a durabilidade da estrutura.

Foram aplicados no estudo três tipos de validação: teórica (comparação com soluções analíticas), inter-modelo (comparação com outros modelos) e experimental

(comparação com dados experimentais). As simulações foram conduzidas utilizando o código Fortran e o software COMSOL Multiphysics. Os resultados foram comparados com dados de estudos prévios e experimentos realizados em câmaras climáticas.

A pesquisa reforça a aplicabilidade dos modelos Kunzel e Liu em simulações higrotérmicas, mas o modelo de Kunzel demonstrou limitações quando a umidade relativa se aproxima de 95%, o que sugere que ele não é adequado para simulações próximas da zona "sobre-higroscópica". Logo, há uma necessidade de validações adicionais para condições extremas de umidade.

Wang *et al.* (2021) investigaram o efeito da transferência de umidade e calor através dos cantos extremos de edificações resfriadas em áreas quentes e úmidas. A pesquisa analisa como a umidade influencia o fluxo de calor, com ênfase nas pontes térmicas localizadas nos cantos das edificações, e as implicações desse fenômeno no consumo de energia. Foram realizadas simulações numéricas usando o software COMSOL Multiphysics para modelar a transferência acoplada de calor e umidade em três tipos diferentes de cantos de construção (muro de tijolos, canto de coluna de concreto estrutural e canto com coluna de armação). O modelo foi validado com dados experimentais e benckmarcks de transferência higrotérmica. Compararam-se os comportamentos em diferentes ambientes, como áreas quentes e úmidas e áreas frias e secas, e a inclusão de isolamento térmico para avaliar o impacto sobre a transferência de calor e umidade nos cantos.

O estudo de Wang *et al.* (2021) demonstrou que a umidade pode aumentar significativamente a transferência de calor, o que agrava o consumo de energia para resfriamento em áreas quentes e úmidas. Ao considerar os efeitos da umidade, o fluxo de calor aumenta em até 47,3% nos cantos, dependendo da umidade externa. Adicionar isolamento reduz a transferência de calor, mas também pode aumentar o fluxo de umidade em certas condições. Os resultados também indicam que ignorar a transferência de umidade pode levar a subestimativas significativas do fluxo de calor, especialmente em cantos de edifícios localizados em regiões quentes e úmidas.

Embora o modelo aborde a transferência acoplada de calor e umidade, ele faz simplificações, como a suposição de que os materiais porosos são homogêneos e isotrópicos. Além disso, o estudo não considera efeitos adicionais como vento, radiação solar ou chuva, que podem influenciar nesse caso de estudo.

Berger *et al*. (2021) desenvolveram uma formulação adimensional para analisar os fenômenos de transferência de calor e massa em materiais porosos utilizados em edificações. A proposta foi criar uma metodologia que permitisse entender e comparar esses fenômenos sem a necessidade de ferramentas computacionais, utilizando números adimensionais para simplificar as equações governantes de transferência de calor e massa. A metodologia envolveu a escalagem das equações que governam a transferência de calor e umidade em materiais porosos. A partir disso, os pesquisadores introduziram números adimensionais para facilitar a identificação dos fenômenos preponderantes em diferentes categorias de materiais. Foram avaliados 49 materiais de construção, divididos em sete categorias. A análise comparou a predominância dos fenômenos de transporte de calor e massa em diferentes materiais, permitindo entender como o comportamento de cada material varia em relação à condução de calor e à movimentação de umidade. O estudo utilizou dados experimentais e referências de literatura para validar os resultados e assegurar que os modelos adimensionais fossem precisos na descrição dos fenômenos físicos em materiais porosos.

A abordagem adotada permitiu avaliar rapidamente os materiais de construção sem recorrer a simulações complexas, facilitando o processo de seleção de materiais com base em suas propriedades térmicas e higrotérmicas. Mas, embora a formulação adimensional simplifique a análise, algumas suposições feitas, como desconsiderar a convecção e limitar-se a processos difusivos, podem não capturar todos os aspectos reais de transferência de umidade e calor. A metodologia adimensional é eficaz para identificar tendências gerais, mas a análise detalhada de comportamentos não-lineares pode exigir simulações mais complexas e não é totalmente resolvida pela simplificação proposta.

Zhao *et al*. (2022) propuseram uma análise experimental e numérica das características de secagem de dois materiais porosos capilares usados em construção: o silicato de cálcio e o tijolo cerâmico. Foram realizadas medições de comportamento de secagem em diferentes condições (altura da amostra, área de evaporação e velocidade do fluxo de ar). A simulação numérica utilizou o software Delphin 5 para modelar o transporte de calor e umidade em 3D, com base nos parâmetros coletados. O objetivo era ajustar os coeficientes de transferência de calor e vapor e obter uma visão detalhada do comportamento dos materiais ao longo do processo de secagem.

A taxa de secagem na primeira fase foi afetada pela área de evaporação e pela velocidade do fluxo de ar, enquanto a altura da amostra influenciou mais na segunda fase. O silicato de cálcio mostrou uma fase de secagem inicial mais longa devido à sua alta condutividade de umidade e baixa condutividade térmica. As conclusões dependem das condições controladas e tamanhos de amostras específicas, o que limita a generalização. Fatores como a precisão dos sensores de umidade e temperatura também podem introduzir uma variabilidade nos resultados.

Xue *et al.* (2023) abordaram a transferência de calor e umidade em pontes térmicas entre paredes e pisos, e como isso afeta o desempenho térmico de edifícios. O estudo investigou os efeitos acoplados HAMT (Heat and Moisture Transfer) em pontes térmicas entre paredes e pisos (WFTB – Wall-to-Floor Thermal Bridge) e como isso impacta o consumo de energia dos edifícios. Pontes térmicas podem aumentar significativamente a demanda por aquecimento e resfriamento, particularmente em ambientes úmidos, onde a umidade altera as propriedades térmicas dos materiais de construção.

Foram realizados experimentos de campo e modelos numéricos validados para analisar o comportamento dessas pontes térmicas, e o modelo acoplado foi utilizado para simular a interação entre esses dois fatores. A pesquisa comparou a transferência de calor nas áreas afetadas pelas pontes térmicas e nas partes principais das paredes, levando em conta o efeito da umidade. Como resultados a transferência de calor foi subestimada quando a umidade não foi considerada. O modelo mostrou que a umidade aumenta a condutividade térmica, piorando o desempenho térmico. A umidade elevada nas regiões das pontes térmicas pode, paradoxalmente, aumentar a condutividade térmica, mesmo com a adição de camadas de isolamento. E a influência da transferência de umidade foi pronunciada em climas úmidos, aumentando a demanda energética para resfriamento. O estudo demonstrou ser eficiente na otimização do isolamento de edifícios em regiões com alta umidade, porém por focar em uma área climática específica, seria necessário testar os resultados em outras regiões para validar a aplicabilidade em climas diferentes.

Zou *et al.* (2023) realizaram um estudo com a modelagem de transferência de calor e umidade em materiais de construção porosos baseados em biocomponentes, focando nos efeitos de histerese e capilaridade dinâmica. A pesquisa propôs um modelo dinâmico de histerese para simulação em materiais higroscópicos, incorporando esses efeitos que

são frequentemente negligenciados em abordagens tradicionais. A histerese refere-se à diferença entre os processos de adsorção e dessorção de umidade, enquanto o efeito dinâmico está relacionado às rápidas variações de pressão capilar em condições não estacionárias.

O modelo foi desenvolvido usando o Método dos Elementos Finitos (FEM) para discretizar as equações diferenciais que governam a transferência de calor e umidade. Foram realizados testes experimentais com concreto de palmeira para validar o modelo, sob condições controladas, simulando ciclos de variações ambientais. Três modelos foram comparados: um modelo padrão, que desconsidera os efeitos de histerese e dinâmicos, um modelo de histerese sem efeitos dinâmicos, e o modelo dinâmico de histerese proposto.

O modelo proposto apresentou melhores resultados na simulação da evolução da umidade em relação aos dados experimentais. Ele foi mais preciso, especialmente em condições com variações rápidas de umidade. A consideração da histerese melhorou significativamente a precisão das previsões, mostrando que a umidade retida devido à histerese impacta o transporte de umidade. O efeito dinâmico foi mais relevante em condições de desorção, acelerando a secagem e melhorando a correspondência entre o modelo e os dados experimentais. Embora o modelo melhore a previsão do comportamento higrotérmico, a influência do efeito dinâmica foi menos pronunciada em condições de umidade estável. Ainda, devido à inclusão desses efeitos, o modelo exige um maior poder computacional. O estudo também foi limitado a condições específicas de umidade e temperatura, logo, mais testes são necessários em outros contextos climáticos e com outros materiais bio-baseados para validar amplamente o modelo.

Kaoutari e Louahlia (2024) investigaram a transferência de calor e umidade em paredes de construção formadas por camadas duplas de materiais biosustentáveis, com o objetivo de melhorar a eficiência energética dos edifícios, analisando como a disposição desses materiais afeta o desempenho térmico e a regulação da umidade. Esses materiais são compostos por uma camada de isolamento de baixa densidade e uma camada estrutural de alta densidade. A pesquisa combina experimentos e modelagem numérica, utilizando modelos matemáticos de Kunzel e Mendes, que são resolvidos através do método das diferenças finitas. Foram realizados testes experimentais para medir as propriedades higrotérmicas dos materiais utilizados, como permeabilidade ao vapor de água, capacidade de sorção e condutividade térmica. Modelos numéricos baseados em equações diferenciais foram desenvolvidos para simular a transferência de calor e umidade ao longo do tempo em diferentes condições climáticas, tanto no verão quanto no inverno. O estudo comparou os resultados experimentais com as simulações numéricas para validar o desempenho dos modelos propostos.

Do estudo verificou-se que as camadas duplas de materiais, quando simuladas em diferentes cenários climáticos, apresentaram variações significativas na distribuição de umidade e calor. O isolamento colocado no lado externo da parede resultou em menor perda de energia no inverso, enquanto no verão, a disposição interna foi mais eficiente na redução do ganho de calor. O modelo de Mendes apresentou resultados mais precisos para simular o fluxo de umidade, especialmente em materiais de camadas duplas, quando comparado ao modelo de Kunzel.

O estudo oferece uma contribuição importante para o desenvolvimento de estratégias de construção sustentável. Mas, embora os modelos tenham se mostrado

eficazes, o estudo foi conduzido em um ambiente controlado, e a validação em edifícios reais e em diferentes condições ambientais ainda é necessária.

11. COMPARAÇÃO DOS MODELOS

Uma comparação entre os modelos clássicos de infiltração – como Green-Ampt, Richards, Philip, Kostiakov e Horton – e os modelos avançados acoplados de calor e umidade revela abordagens distintas em termos de complexidade, precisão e aplicabilidade. Assim, para ajudar no entendimento mais profundo desses modelos, a Tabela 2 demonstra esse comparativo.

Tabela 2 – Comparação entre os modelos de infilração reportados na literatura.

MODELO	PRECISÃO	EFICIÊNCIA COMPUTACIONAL	APLICABILIDADE PRÁTICA	LIMITAÇÕES
MODELOS CLÁSSICOS				
Green-Ampt (1911)	Alta precisão para solos homogêneos e condições iniciais bem definidas.	Moderada. Requer cálculo de frente de umidade, mas é simplificado.	Usado em análises de infiltração rápida em solos agrícolas e em fundações.	Assume uma frente de umidade bem definida, inadequado para solos heterogêneos.
Richards (1931)	Alta precisão, principalmente em condições de fluxo não saturado e saturado.	Baixa eficiência. Resolução numérica complexa e de alto custo computacional.	Usado em simulações detalhadas de infiltração em construções e análises de drenagem.	Requer muitos parâmetros, sensível a condições de contorno e inicialização.
Kostiakov (1932)	Precisão limitada. Bom para solos homogêneos com infiltração inicial rápida.	Alta. Muito simples e rápido de calcular, baseado apenas em dados empíricos.	Usado principalmente em análises de escoamento superficial em construção.	Não considera saturação do solo, não é adequado para solos heterogêneos.
Horton (1941)	Moderada. Melhor para solos com variação moderada de umidade.	Alta. Baseado em equações empíricas simples, portanto eficiente.	Usado para prever escoamento e infiltração em solos urbanos e rurais.	Não considera fatores como redistribuição interna de umidade no solo.
Philip (1957)	Alta precisão para a fase inicial de infiltração e condições homogêneas.	Moderada. Mais eficiente que Richards, mas ainda exige resolução temporal e espacial refinada.	Aplicável para solos homogêneos em construção e projetos agrícolas.	Limitações para longos períodos e solos heterogêneos, não capta bem fluxo a longo prazo.
MODELOS AVANÇADOS				
Abdykarim *et al.* (2019)	Alta precisão em simulações de longo prazo para sistemas com baixa não linearidade.	Melhorada pelo uso do método Super-Time-Stepping (STS), o que permite passos de tempo maiores sem sacrificar a estabilidade.	Aplicável a simulações de longo prazo m sistemas porosos como paredes de terra compactada, otimizado para problemas lineares e fracamente não lineares.	Enfrenta dificuldades com sistemas altamente não lineares e problemas com instabilidade numérica em condições extremas.
Berger *et al.* (2019)	Fornece alta precisão em simulações de transferência de calor e umidade em materiais porosos.	Alta, devido à aplicação de métodos avançados, como o esquema DU FORT-FRANKEL e RUNGE-KUTTA.	Aplicável em estudos de engenharia civil, manejo de umidade e controle térmico em edificações porosas.	O modelo enfrenta desafios em sistemas fortemente não lineares e requer grande capacidade computacional para simulações mais complexas.

Tabela 3 – Comparação entre os modelos de infilração reportados na literatura. (continuação)

MODELO	PRECISÃO	EFICIÊNCIA COMPUTACIONAL	APLICABILIDADE PRÁTICA	LIMITAÇÕES
MODELOS AVANÇADOS				
Mello *et al.* (2019)	Alta precisão ao modelar a transferência de calor e umidade em 2D, especialmente em cavidades.	Menos eficiente devido ao custo computacional do uso do CFD, e simulações bidimensionais.	Aplicável para o estudo detalhado de edificações com elementos porosos vazados, sendo útil para avaliação térmica e de umidade em paredes.	Altamente dependente de recursos computacionais e de difícil aplicação em simulações de longa duração devido ao elevado custo computacional.
Dong *et al.* (2020)	Alta precisão para simular a transferência de calor e umidade em condições controladas. O modelo de Liu foi mais preciso em altas umidades.	Uso de modelos numéricos como COMSOL, exigem alto poder computacional devido à complexidade de cálculos acoplados de calor e umidade.	Aplicável na previsão de desempenho higrotérmico de materiais e na prevenção de crescimento de mofo e degradação estrutural em edificações.	Desempenho limitado em condições extremas de alta umidade (acima de 95%). A infiltração de ar não foi considerada.
Wang *et al.* (2021)	Precisão moderada em simulações de transferência de calor e umidade em cantos de edificações, com foco em áreas quentes e úmidas.	Utiliza simulações numéricas, mas devido ao foco em regiões específicas (cantos de edificações), a demanda computacional é moderada.	Aplicável principalmente em áreas quentes e úmidas para reduzir o consumo de energia em edifícios com problemas de ponte térmicas nos cantos. Pode ser usado para otimização de projetos de isolamento.	Limitado a simulações em condições de resfriamento. Não aborda aquecimento e ignora variáveis como radiação solar, vento e chuva.
Berger *et al.* (2021)	Precisão adequada para identificar tendências gerais na transferência de calor e umidade em materiais porosos. Contudo, a precisão diminui em casos mais complexos que envolvem fenômenos não-lineares.	Muito eficiente computacionalmente, uma vez que a formulação adimensional elimina a necessidade de cálculos complexos. Ideal para análises rápidas sem ferramentas computacionais pesadas.	Adequado para a seleção de materiais, sem necessidade de simulação detalhada. Útil para análises iniciais ou rápidas de desempenho.	As simplificações ignoram fatores como convecção e fenômenos complexos, além de serem necessárias mais análises para novos materiais e comportamentos não-lineares.
Zhao et al. (2022)	Boa precisão para o processo de secagem observado. A precisão pode ser afetada pela variabilidade nas condições de teste, como fluxo de ar e tamanho das amostras.	A simulação 3D permite maior detalhamento, mas compromete a rapidez de execução. Ajustes iterativos dos coeficientes de transferência aumentam o tempo de processamento.	Útil para modelagem de desempenho hídrico e térmico de fachadas e materiais de construção. Pode ser aplicado para estimar a durabilidade e a eficiência energética de materiais em ambientes reais.	A generalização é limitada às condições controladas dos experimentos. A precisão dos sensores de umidade e temperatura pode introduzir erros nos resultados.
Xue *et al.* (2023)	Alta para climas úmidos e variações sazonais. Inclui umidade como fator chave na condutividade térmica.	Moderada. O modelo utilizado requer considerável poder computacional devido ao acoplamento entre calor e umidade.	Aplicável em regiões com variações significativas de umidade, sendo útil na construção de edifícios energicamente eficientes.	O modelo simplifica alguns efeitos, como radiação e chuva impulsionada pelo vento. Exige validação em climas diferentes.

Tabela 4 – Comparação entre os modelos de infilração reportados na literatura. (continuação)

MODELO	PRECISÃO	EFICIÊNCIA COMPUTACIONAL	APLICABILIDADE PRÁTICA	LIMITAÇÕES
MODELOS AVANÇADOS				
Zou *et al.* (2023)	Precisão elevada ao incluir histerese e capilaridade dinâmica, melhorando a previsibilidade de variações de umidade.	Exige maior poder computacional para incluir efeitos de histerese e capilaridade, tornando a simulação mais complexa.	Adequado para otimizar materiais higroscópicos e prever comportamento térmico de construções sustentáveis em condições variáveis de umidade.	Modelo complexo e exige mais poder computacional. Resultados experimentais limitados à condições específicas.
Kaoutari e Louahlia (2024)	Alta precisão nas simulações numéricas usando os modelos de Kunzel e Mendes, especialmente em materiais biossustentáveis.	Boa eficiência computacional. O uso de MATLAB permite simulações eficazes, mas a resolução detalhada de camadas duplas aumenta o tempo de processamento.	Altamento aplicável em construções sustentáveis que utilizam materiais biossustentáveis. Oferece informações sobre o melhor posicionamento do isolamento em climas variados.	Resultados experimentais limitados a ambientes controlados. Necessidade de mais validação em edifícios reais com variações climáticas.

Os modelos clássicos, como o de Green-Ampt (1911), baseiam-se em princípios físicos simplificados, assumindo uma frente de umidade definida, sendo úteis em solos homogêneos e para infiltrações iniciais. Embora eficiente em eventos curtos de chuva, o modelo não lida bem com solos heterogêneos ou fluxos prolongados. Já o modelo de Richards (1931) é mais preciso, capaz de lidar com fluxos em solos saturados e não saturados, porém é computacionalmente oneroso devido a necessidade de resolver equações diferenciais complexas. Philip (1957) também oferece uma abordagem física sólida, focando nas fases iniciais da infiltração, mas apresenta limitações para períodos mais longos e solos mais complexos.

Em contrapartida, os modelos empíricos, como Kostiakov e Horton, são mais simples e computacionalmente leves, baseados em dados experimentais. Enquanto o Kostiakov é útil em situações de infiltração rápida, sem considerar a saturação do solo, Horton descreve a taxa de infiltração decrescente ao longo do tempo, sendo aplicável em áreas urbanas e rurais. Entretanto, ambos são limitados em cenários mais complexos, onde o comportamento do solo varia significativamente.

Por outro lado, os modelos avançados acoplados de calor e umidade fornecem uma descrição muito mais detalhada do comportamento da umidade em materiais porosos. Ao incorporar o transporte simultâneo de calor e umidade, esses modelos permitem simular com precisão os efeitos da temperatura sobre o fluxo de umidade. Enquanto os modelos clássicos focam apenas no movimento da água, os modelos acoplados levam em conta o impacto da variação da temperatura nos fluxos de umidade, fornecendo uma visão mais completa dos processos higrotérmicos. Softwares, como o COMSOL e o HAM, são aplicados em análises de desempenho energético e controle de umidade em edifícios. No entanto, a complexidade adicional trazida pelo acoplamento requer maior poder computacional e dados detalhados sobre as propriedades dos materiais.

12. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A infiltração da umidade em meios porosos de edificações aborda uma problemática central na durabilidade e segurança de construções, pois a entrada e o acúmulo de água em materiais como concreto, tijolos e revestimentos comprometem a estrutura e podem levar à deterioração precoce. Esse processo está profundamente ligado a variáveis ambientais, como temperatura, umidade relativa do ar e gradientes de pressão, que tornam o controle da umidade em edificações um desafio contínuo. A complexidade do movimento da água em materiais porosos exige, portanto, uma compreensão detalhada dos fenômenos envolvidos, o que motivou o desenvolvimento de modelos matemáticos progressivamente mais sofisticados.

Os modelos empíricos iniciais, como os de Kostiakov e Horton, ofereceram ferramentas práticas para estimar a infiltração de água em solos homogêneos e em eventos de curta duração. Esses modelos mostraram-se eficientes para simulações de escoamento superficial e infiltração rápida, mas não capturam adequadamente a dinâmica da umidade em condições de saturação prolongada, assim como o modelo de Green-Ampt. Com o modelo de Philip, tornou-se possível modelar o comportamento da umidade em fases distintas – uma dominada pela capilaridade e outra pela gravidade – proporcionando uma descrição mais completa da infiltração inicial. No entanto, o modelo de Philip possui limitações em condições mais prolongadas e para solos heterogêneos.

A introdução do modelo de Richards permitiu um avanço notável, ao integrar a análise de fluxos saturados e não saturados de forma mais detalhada, permitindo simulações contínuas e uma representação precisa das interações entre umidade e solo. Contudo, o alto custo computacional associado ao modelo trouxe à tona a necessidade de otimizar o processamento das simulações. A transição para os modelos acoplados ofereceu uma descrição mais precisa dos fenômenos e seus efeitos sobre a durabilidade das construções. Essa evolução possibilitou simulações que consideram não apenas a infiltração de água, mas também as trocas de energia e sua influência na estrutura dos materiais.

Apesar dos avanços, os modelos atuais enfrentam obstáculos significativos, em termos de exigências computacionais e da necessidade de dados precisos. Porém, é esperado, que muitos dos problemas computacionais de hoje sejam solucionados em cerca de uma década, conforme as tecnologias de simulação de dados continuam a evoluir. Da mesma forma, novos desafios técnicos devem surgir, que posteriormente serão enfrentados por tecnologias mais avançadas, perpetuando um ciclo de inovação no campo da modelagem de umidade.

A pesquisa sobre infiltração e controle de umidade pode focar também no aprendizado de máquina para otimizar a modelagem dos processos de infiltração, além de melhorar a coleta e análise de dados de campo. A criação de modelos híbridos que combinam métodos numéricos e análises de dados em tempo real também pode representar uma nova fronteira, permitindo simulações rápidas e precisas, adaptadas a diferentes tipos de materiais e condições climáticas. Outro ponto a ser analisado é a adaptação dos modelos a cenários climáticos extremos, como aqueles causados pelas mudanças climáticas, que afetam diretamente os ciclos de umidade e evaporação nos materiais de construção.

Paralelamente, o uso de soluções impermeabilizantes específicos, como membranas de vedação, selantes e materiais com aditivos repelentes de água, continuam a ser uma medida eficaz para controlar a infiltração. Essas soluções, aliadas a um

entendimento detalhado dos processos, permitem uma proteção adicional para materiais expostos a umidade constante, principalmente em áreas suscetíveis a altos níveis de precipitação.

Além disso, o desenvolvimento de novos materiais de construção com propriedade de autorregulação da umidade, como concretos e argamassas permeáveis de nova geração, também abrirá espaço para a criação de modelos adaptativos que levem em consideração as inovações tecnológicas no setor de construção civil. Esses avanços trarão mais eficiência no controle da umidade, prolongando a via útil das edificações e aumentando a sustentabilidade dos materiais utilizados.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Apoio à Pesquisa do Estado da Paraíba (FAPESQ-PB), Termo de Outorga nº 2024/2023, pelo incentivo à pesquisa e auxílio financeiro, e a UFCG pela infraestrutura.

REFERÊNCIAS

[1] ABDYKARIM, M.; BERGER, J.; DUTYKH, D.; SOUDANI, L.; AGBOSSOU, A. Critical assessment of efficient numerical methods for a long-term simulation of heat and moisture transfer in porous materials. International Journal of Thermal Sciences, v. 145, n. June, p. 105982, 2019.

[2] AMMAR, M. A.; CHEGENIZADEH, A.; BUDIHARDJO, M. A., NIKRAZ, H. The Effects of Crystalline Admixtures on Concrete Permeability and Compressive Strength : A Review. Buildings, v. 14, p. 3000, 2024.

[3] ANTÓN, C.; GURDIÁN, H.; VERA, G.; CLIMENT, M. Effect of a Crystalline Admixture on the Permeability Properties of Concrete and the Resistance to Corrosion of Embedded Steel. Applied Sciences, v. 14, p. 1731, 2024.

[4] ARMSTRONG, R. T.; MCCLURE, J. E.; ROBINS, V.; LIU, Z.; ARNS, C. H.; SCHLUTER, S.; BERG, S. Porous Media Characterization Using Minkowski Functionals: Theories, Applications and Future Directions. Transport in Porous Media, v. 130, n. 1, p. 305–335, 2019.

[5] Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 9575: impermeabilização – Seleção e projeto. Rio de Janeiro, 2010.

[6] BARBOSA, M. T. G.; ROSSE, V. J.; LAURINDO, N. G. Thermography evaluation strategy proposal due moisture damage on building facades. Journal of Building Engineering, v. 43, n. March, p. 102555, 2021.

[7] BARROSO, G. F.; MENESES, F. M. C.; CAMPOS JÚNIOR, D. J.; MAGALHÃES, S. R. Sistemas de impermeabilizações (ênfase em manta asfáltica). Revista de Iniciação Científica da Universidade Vale do Rio Verde, v. 5, p. 42–57, 2015.

[8] BATISTA, B. M.; PEREIRA, I. N. A.; SANTOS, K. S. F.; PINHEIRO, E. C. N. M. Estudo da importância de impermeabilizantes no processo executivo de construções. Revista FT, p. 1–22, 2024.

[9] BERGER, J.; DUTYKH, D.; MENDES, N.; RYSBAIULY, B. A new model for simulating heat, air and moisture transport in porous building materials. International Journal of Heat and Mass Transfer, v. 134, p. 1041–1060, 2019.

[10] BERGER, J.; LEGROS, C.; ABDYKARIM, M. Dimensionless formulation and similarity to assess the main phenomena of heat and mass transfer in building porous material. Journal of Building Engineering, v. 35, n. October 2020, p. 101849, 2021.

[11] BOUWER, H.; RICE, R. C. A slug test for determining hydraulic conductivity of unconfined aquifers with completely or partially penetrating wells. Water Resources Research, v. 5, n. 2, p. 428-438, 1969.

[12] CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO. Desempenho de edificações habitacionais: guia orientativo para atendimento à norma ABNT NBR 15575/2012. Gadioli Cipolla Comunicação, [s. l.], v. 2, p. 311, 2013.

[13] CASTAÑEDA-MIRANDA, A.; ALEMÁN-AYALA, K.; CASTAÑO-MENESES, V. M. The Development of a new virtual croplands erosion measurement system using three-dimensional laser scanner and empirical Kostiakov-Lewis models. Optics and Laser Technology, v. 117, n. March, p. 316–332, 2019.

[14] DAFICO, L. C. M.; BARREIRA, E.; ALMEIDA, R. M. S. F.; VICENTE, R. Machine learning models applied to moisture assessment in building materials. Construction and Building Materials, v. 405, n. September, p. 133330, 2023.

[15] DARCY, HENRY. Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon. Victor Dalmon, Paris, 1856. 647 p.

[16] DENG, P.; ZHU, J. Analysis of effective Green-Ampt hydraulic parameters for vertically layered soils. Journal of Hydrology, v. 538, p. 705–712, 2016.

[17] DONG, W.; CHEN, Y.; BAO, Y.; FANG, A. A validation of dynamic hygrothermal model with coupled heat and moisture transfer in porous building materials and envelopes. Journal of Building Engineering, v. 32, n. May, p. 101484, 2020.

[18] EPA-UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Estimation of infiltration rate in the vadose zone: Compilation of simple mathematical models, v. 1, 1998. 84 p.

[19] FAILACHE, M. F. Proposta de procedimentos para a estimativa da infiltração potencial e do escoamento superficial Hortoniano potencial baseada em dados geológicos, geotécnicos, de uso e ocupação e eventos de chuva. (Tese). Programa de Pós-Graduação em Geotecnia. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. 332 p., 2018.

[20] FANG, A.; CHEN, Y.; WU, L. Modeling and numerical investigation for hygrothermal behavior of porous building envelope subjected to the wind driven rain. Energy and Buildings, v. 231, p. 110572, 2021.

[21] FEDORIK, F.; NIEMI, A. H. Hygrothermal assessment and design models for mass timber building envelopes in northern conditions. Engineering Structures, v. 305, n. February, p. 117714, 2024.

[22] FERNANDES, H. E.; FERNANDES, Í. C. R.; ROSA, D. DE J. Q. A necessidade de impermeabilização na construção civil: estudo de caso na cidade contagem, mg. Paramétrica, p. 1–39, 2022.

[23] GREEN, W. H.; AMPT, G. A. Studies on soil physics 1, The flow of air and water through soils. Journal of Agricultural Science, v. 4, p. 1-24, 1911.

[24] HORTON, R. E. 1941. An approach towards physical interpretation of infiltration capacity. Proc. Soil Sci. Soc. Am 5: 399– 417.

[25] HUANG, Q. Z.; HSU, S. Y.; SYU, C. H. Empirical formulas for dynamic effective suction head in the modified green-ampt model. Journal of Hydrology, v. 642, n. January, p. 131820, 2024.

[26] HUNG, V. V.; SEO, S.; KIM, H.; LEE, G. Permeability and Strength of Pervious Concrete According to Aggregate Size and Blocking Material. Sustainability, v. 13, p. 426, 2021.

[27] ISLAHUDDIN, M.; JANSSEN, H. Pore-Structure-Based Determination of Unsaturated Hygric Properties of Porous Materials. Transport in Porous Media, v. 130, n. 3, p. 675–698, 2019.

[28] KAMEL, E.; HABIBI, S.; MEMARI, A. M. State of the practice review of moisture management in residential buildings through sensors. Structures, v. 59, n. March 2023, p. 105698, 2024.

[29] KAOUTARI, T.; LOUAHLIA, H. Experimental and numerical investigations on the thermal and moisture transfer in green dual layer wall for building. Case Studies in Thermal Engineering, v. 53, n. December 2023, p. 103946, 2024.

[30] KOSTIAKOV, A. N. On the dynamics of the coefficient of water-percolation in soils and on the necessity for studying it from a dynamic point of view for purposes of amelioration. In: Transactions Congress International Society for Soil Science, Moscow, Part A, p. 17-21, 1932.

[31] LIU, G.; LI, S.; WANG, J. New Green-Ampt model based on fractional derivative and its application in 3D slope stability analysis. Journal of Hydrology, v. 603, n. PC, p. 127084, 2021.

[32] LONG, Z.; ZHANG, Z.; ZHANG, H. Nondestructive measurement of the capillary water absorption coefficient and water transport behaviors of porous building materials by using single-sided NMR. Construction and Building Materials, v. 414, n. December 2023, p. 134819, 2024.

[33] MAGALHÃES, R. A. B.; ASSUNÇÃO, R. F.; SILVA, L. S.; FERREIRA, M. S.; ASSUNÇÃO, W. R. Estudo de caso de patologias causadas pela umidade face a inexistência de implantação do sistema de impermeabilização nas garagens do 1o e 2o subsolo de um edifício residencial multifamiliar de múltiplos pavimentos em Belém/PA. RCT - Revista de Ciência e Tecnologia, v. 5, n. 9, 2019.

[34] MEIN, R.; LARSON, C. Modelling infiltration during a steady rain. Water Resouces Research, v. 9, n. 2, p. 384- 394, 1973

[35] MELLO, L. A. DE; MOURA, L. M.; MENDES, N. A model for assessment of heat and moisture transfer through hollow porous buildings elements. Case Studies in Thermal Engineering, v. 14, n. April, p. 100446, 2019.

[36] MORAIS, A. L. S. DE; PEREIRA, R. S. F.; OLIVEIRA, T. M. Transferência de massa por meio de difusão em corpos porosos: Aplicações industriais. Journal of Exact Sciences, v. 31, p. 5–11, 2021.

[37] NETTO, M. S.; AVELLANEDA, C. A. O.; BRUM, R. S.; PORTO, J. S.; SILVA, T. P. Simulação Computacional da Umidade: Estudo do Desempenho de Uma Edificação. Anais do XXV ENMC - Encontro Nacional de Modelagem Computacional, 2022.

[38] OLIVEIRA, L. A. A. DE; NUNES, L. A. DA S. Estudo da infiltração por umidade ascendente em residências unifamiliares. Ciência e Tecnologia, p. 1–10, 2020.

[39] PANICO, S.; HERRERA-AVELLANOSA, D.; TROI, A. Monitoring rising damp in solid masonry walls: An experimental comparison of five different methods. Journal of Building Engineering, v. 75, n. March, p. 106999, 2023.

[40] PHILIP, J. R.; DE VRIES, D. A. Moisture movement in porous materials under temperature gradients. Eos, Transactions American Geophysical Union, [s. l.], v. 38, n. 2, p. 222–232, 1957.

[41] RICHARDS, L. A. Capillary conduction of liquids through porous mediums. Journal of Applied Physics, v. 1, n. 5, p. 318-333, 1931.

[42] SMITH, R. E.; HEBBERT, R. B. Infiltration Theory for Hydrologic Applications. Water Resources Monograph Series. 2002.

[43] SONAJE, N. Modelling of infiltration process. Indian Journal of Applied Research, v. 3, 2013.

[44] STRANGFELD, C. Determination of the diffusion coefficient and the hydraulic conductivity of porous media based on embedded humidity sensors. Construction and Building Materials, v. 263, p. 120092, 2020.

[45] TARIKU, F.; KUMARAN, K.; FAZIO, P. Transient model for coupled heat, air and moisture transfer through multilayered porous media. International Journal of Heat and Mass Transfer, v. 53, n. 15–16, p. 3035–3044, 2010.

[46] TASHAYO, B.; HONARBAKHSH, A.; AKBARI, M.; OSTOVARI, Y. Geoderma Regional Digital mapping of Philip model parameters for prediction of water in fi ltration at the watershed scale in a semi-arid region of Iran. Geoderma Regional, v. 22, p. e00301, 2020.

[47] TORRES, I. New technique for treating rising damp in historical buildings: Wall base ventilation. Journal of Cultural Heritage, v. 31, p. S60–S70, 2018.

[48] TURNER, E. R. Comparison of infiltration equations and their field validation with rainfall simulation. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia de Pesquisas Biológicas, Maryland, 2006.

[49] WANG, N.; CHU, X. Revised Horton model for event and continuous simulations of in fi ltration. Journal of Hydrology, v. 589, n. June, p. 125215, 2020.

[50] WANG, T.; XU, H.; BAO, W. Application of isotopic information for estimating parameters in Philip infiltration model. Water Science and Engineering, v. 9, n. 4, p. 287–292, 2017.

[51] WANG, Y.; WANG, W.; WANG, D.; LIU, Y.; LIU, J. Study on the influence of sample size and test conditions on the capillary water absorption coefficient of porous building materials. Journal of Building Engineering, v. 43, n. 13, p. 103120, 2021a.

[52] WANG, Y.; TIAN, Y.; ZHAO, Z.; WANG, D.; LIU, Y.; LIU, J. Effect of moisture transfer on heat transfer through exterior corners of cooled buildings in hot and humid areas. Journal of Building Engineering, v. 43, n. 13, p. 103160, 2021b.

[53] XUE, Y.; FAN, Y.; WANG, Z.; GAO, W.; SUN, Z.; GE, J. Facilitator of moisture accumulation in building envelopes and its influences on condensation and mould growth. Energy and Buildings, v. 277, p. 112528, 2022.

[54] XUE, Y.; FAN, Y.; CHEN, S.; WANG, Z.; GAO, W.; SUN, Z.; GE, J. Heat and moisture transfer in wall-to-floor thermal bridges and its influence on thermal performance. Energy and Buildings, v. 279, p. 112642, 2023.

[55] ZAKWAN, M.; MUZZAMMIL, M.; ALAM, J. Application of spreadsheet to estimate infiltration parameters. Perspectives in Science, v. 8, p. 702–704, 2016.

[56] ZHANG, Q.; KANG, Z.; LING, Y.; CHEN, H.; LI, K. et al. Influence of Temperature on the Moisture Transport in Concrete. Crystals, v. 11. p. 8, 2021.

[57] ZHAO, J.; FENG, S.; GRUNEWALD, J.; MEISSNER, F.; WANG, J. Drying characteristics of two capillary porous building materials: Calcium silicate and ceramic brick. Building and Environment, v. 216, n. November 2021, p. 109006, 2022.

[58] ZHOU, F.; LI, W.; HU, Y.; HUANG, L.; XIE, Z.; YANG, J.; WU, D.; CHEN, Z. Moisture Diffusion Coefficient of Concrete under Different Conditions. Buildings, v. 23, 2023.

[59] ZOU, Y.; PROMIS, G.; GRONDIM, F.; SAAD, M.; LOUKILI, A.; WANG, H. A dynamic hysteresis model of heat and mass transfer for hygrothermal bio-based materials. Journal of Building Engineering, v. 79, n. March, p. 107910, 2023.

Capítulo 6

Análise de atenuação de vibrações utilizando absorvedor dinâmico tipo pêndulo com fio LMF Ni-Ti superelástico

Karoline Stefany Ferreira da Luz[1]
Marcelio Ronnie Dantas de Sá[2]

Resumo: O objetivo deste trabalho foi caracterizar dinamicamente um absorvedor de vibrações (ADV) superelástico. O dispositivo estudado consiste em um pêndulo acoplado a um pórtico de um grau de liberdade, sendo que a haste do pêndulo é um fio LMF de Ni-Ti superelástico. Inicialmente, a concepção estrutural foi desenvolvida em ambiente computacional com o objetivo de se estimar as dimensões geométricas do sistema pórtico. O comprimento da haste do pêndulo foi calculado de modo que a frequência natural do absorvedor fosse a mesma do sistema primário. Com isso, o método de largura de banda foi utilizado para estimativa do amortecimento. Foi realizada uma análise experimental para a estrutura sem e com a incorporação de fios LMF através de um pêndulo e verificando as alterações em parâmetros importantes, como as variações de rigidez e amortecimento, para assim poder realizar os ajustes necessários para um bom desempenho do sistema absorvedor. Pôde-se observar uma região de antirressonância gerado pelo ADV, permitindo que o sistema principal seja excitado em sua frequência natural original e não sofra nenhum dano devido a vibrações.

Palavras–chave: Absorvedor Dinâmico de Vibrações; Amortecimento; Ligas Memória de Forma;

[1] Docente Metalmecânica do Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial – SENAI PE
[2] Docente Metalmecânica do Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial – SENAI PE

1. INTRODUÇÃO

Máquinas, equipamentos industriais e estruturas de construção civil frequentemente enfrentam vibrações indesejadas que podem comprometer sua funcionalidade, integridade ou conforto dos usuários. Para controlar ou eliminar essas vibrações, utiliza-se Absorvedores Dinâmicos de Vibrações (ADVs), sistemas compostos por elementos de massa, rigidez e amortecimento (estrutura secundária) acoplados a uma estrutura primária, que atenuam vibrações em uma faixa de frequência específica. Seu funcionamento baseia-se na geração de uma força oposta à excitação, criando um fenômeno de anti-ressonância quando o ADV está sintonizado para a frequência de excitação (KOTINDA, 2010).

Além de ADVs passivos e sistemas de controle ativos, materiais inteligentes, como Ligas Memória de Forma (LMF), têm sido explorados para reforçar estruturas e mitigar vibrações. Esses materiais podem ter suas propriedades mecânicas ajustadas por campos elétricos, magnéticos, temperatura ou tensão, destacando-se pela capacidade de dissipar energia (MORAES, 2017; LAGOUDAS, 2008).

LMFs são ligas metálicas que recuperam deformações por transformações de fase induzidas por temperatura ou tensão (OTSUKA & WAYMAN, 1998). Sua superelasticidade permite recuperar deformações em regimes dinâmicos, dissipando energia por meio de laços de histerese, sendo aplicadas em absorvedores de vibração e impacto em diferentes escalas (OLIVEIRA, 2014).

Neste trabalho, busca-se caracterizar dinamicamente um ADV superelástico composto por um pêndulo com fio de Ni-Ti superelástico. A superelasticidade do fio visa melhorar a redução da amplitude de vibrações em frequências de ressonância e ampliar a banda operacional, explorando sua capacidade de dissipação de energia.

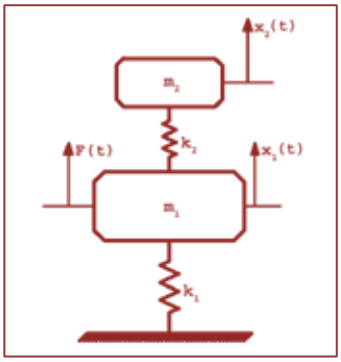
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Absorvedores Dinâmicos de Vibrações (ADVs) são sistemas com massa, rigidez e amortecimento que atenuam vibrações em faixas específicas de frequência, sendo aplicados em engenharia mecânica, civil e aeroespacial, como em estabilizadores de navios, torres de antenas e proteção sísmica (Borges, 2008). Seu funcionamento gera uma força oposta à de excitação, criando anti-ressonância. Para isso, os parâmetros de massa, rigidez e amortecimento devem ser ajustados à frequência de excitação, garantindo a sintonização do ADV (Kotinda, 2010).

2.1. ABSORVEDOR DINÂMICO DE VIBRAÇÃO NÃO AMORTECIDO

Em um sistema vibratório primário não amortecido com um grau de liberdade (1 GDL), um sistema secundário de 1 GDL pode ser acoplado como ADV, conforme representado na Figura 1.

Figura 1. Modelo de uma estrutura primária com ADV não amortecido.



Fonte - Kotinda (2010).

A massa principal é excitada por uma força de amplitude F0 e frequência de excitação dada por ω.

$$F(t) = F_0 e^{i\omega t} \quad (1)$$

As respostas das equações (4) e (5) podem ser definidas como:

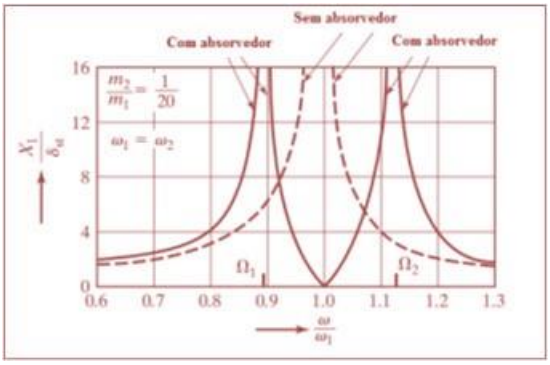
$$\frac{X_1}{\delta_{st}} = \frac{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_2}\right)^2}{\left[1 + \frac{k_2}{k_1} - \left(\frac{\omega}{\omega_1}\right)^2\right]\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_2}\right)^2\right] - \frac{k_2}{k_1}} \quad (2)$$

$$\frac{X_2}{\delta_{st}} = \frac{1}{\left[1 + \frac{k_2}{k_1} - \left(\frac{\omega}{\omega_1}\right)^2\right]\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_2}\right)^2\right] - \frac{k_2}{k_1}} \quad (3)$$

A Figura 2 ilustra a equação (5), onde nota-se a função de resposta em frequência (FRF) típica de um sistema de dois graus de liberdade. Por se tratar de um sistema de dois graus de liberdade, existem duas frequências naturais e, devido a introdução do ADV, aparece uma anti-ressonância na frequência $\omega = \omega^2$.

Podemos ver pela Figura 2 que o absorvedor dinâmico de vibração, embora elimine a vibração na frequência aplicada conhecida ω, introduz duas frequências de ressonância Ω_1 e Ω_2, nas quais a amplitude da máquina é infinita. Portanto, na prática, a frequência de operação ω deve ser mantida longe das frequências Ω_1 e Ω_2.

Figura 2. Efeito de um absorvedor de vibração de vibração não amortecido sobre a resposta da máquina.

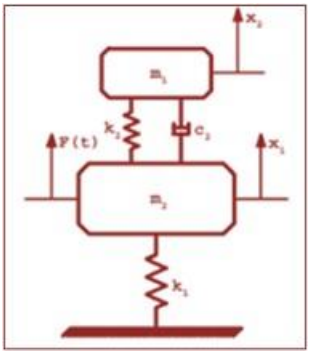


Fonte – Rao (2011)

2.2. ABSORVEDOR DINÂMICO DE VIBRAÇÃO AMORTECIDO

O absorvedor dinâmico de vibração não amortecido elimina o pico de ressonância original, mas cria dois novos picos, resultando em grandes amplitudes na partida e parada da máquina. Com a adição de um absorvedor amortecido, a amplitude é reduzida, pois ele dissipa gradualmente a energia recebida enquanto exerce uma força oposta, diminuindo as oscilações (Meirovicth, 2001). A Figura 3 ilustra um sistema primário não amortecido (m1, k1) ao qual é acoplado um ADV passivo amortecido (m2, k2, c2).

Figura 3. Sistema Primário +ADV amortecido.



Fonte - Kotinda (2010).

Para o sistema de 2 GDL resultante, as equações de movimento das duas massas são dadas por:

$$m_1\ddot{x}_1 + k_1x_1 + k_2(x_1 - x_2) + c_2(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) = F_0 \sin \omega t \quad (4)$$

$$m_2\ddot{x}_2 + k_2(x_2 - x_1) + c_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) = 0 \quad (5)$$

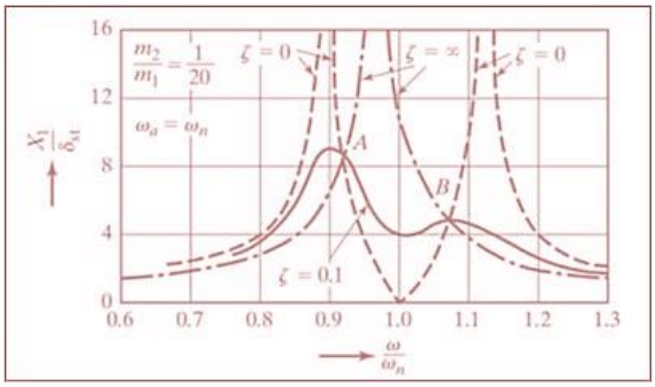
As magnitudes das respostas das equações (9) e (10), X_1 e X_2, são expressas por:

$$\frac{X_1}{\delta_{st}} = \left[\frac{(2\zeta g)^2 + (g^2 - f^2)^2}{(2\zeta g)^2(g^2 - 1 + \mu g^2)^2 + \{\mu f^2 g^2 - (g^2 - 1)(g^2 - f^2)\}^2}\right]^{1/2} \quad (6)$$

$$\frac{X_2}{\delta_{st}} = \left[\frac{(2\zeta g)^2 + f^4}{(2\zeta g)^2(g^2 - 1 + \mu g^2)^2 + \{\mu f^2 g^2 - (g^2 - 1)(g^2 - f^2)\}^2}\right]^{1/2} \quad (7)$$

A Figura 4 apresenta as amplitudes de resposta do sistema primário em um caso genérico, para diferentes fatores de amortecimento ζ. Por meio desse resultado, pode-se observar a ação de um absorvedor dinâmico amortecido na amplitude de oscilação do sistema primário.

Figura 4. Efeito de um absorvedor de vibração amortecido sobre a resposta da máquina.



Fonte: Rao (2011)

É importante notar que o fator de amortecimento influencia no grau de achatamento da curva de resposta, e que quando o fator de amortecimento é muito grande, tendendo a um valor infinito, o comportamento do sistema é idêntico ao de um sistema de um grau de liberdade, de massa igual a (m1+m2), uma vez que as duas massas tornam-se virtualmente unidas pelo amortecedor.

2.3. MODELOS DE AMORTECIMENTO

A caracterização do sistema oscilatório é importante para entender como a energia mecânica é dissipada e sua dependência com a velocidade e com a amplitude de vibração. Um modelo de amortecimento deve ser escolhido para representar essa dissipação de energia mecânica e permitir o cálculo de parâmetros comparativos de amortecimento. Existem inúmeros modelos para descrever o amortecimento, os mais usuais serão descritos a seguir.

2.3.1. AMORTECIMENTO VISCOSO

O movimento de um sistema pode ser descrito por equações diferenciais, baseadas na segunda lei de Newton, que envolvem parâmetros variáveis no tempo. Os sistemas podem também ser classificados de acordo com o número de graus de liberdade (GDL) do movimento, ou seja, o número de coordenadas independentes necessárias para descrever o movimento (MASOTTI, 2013).

No modelo viscoso parte-se do pressuposto de que a força de amortecimento é proporcional à velocidade, representando uma oposição ao movimento, sendo descrita pela equação:

$$F = -c\dot{x} \qquad (8)$$

Onde c é o coeficiente de amortecimento viscoso e $\dot{x}$ é a velocidade de deslocamento da massa em relação a um ponto fixo. Como exemplo de um sistema com amortecimento viscoso pode-se imaginar um pistão em um cilindro preenchido com líquido.

2.4. LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA

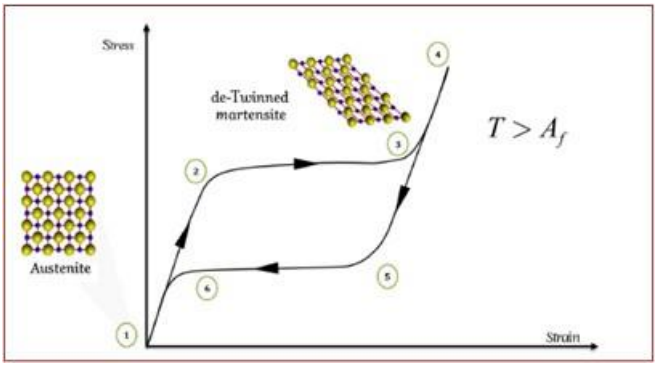
Ligas Memória de Forma (LMF) são materiais metálicos capazes de recuperar deformações permanentes por transformações de fase sólidas induzidas por temperatura ou tensões (Otsuka & Wayman, 1998). Classificadas como materiais ativos, ao lado de piezoelétricos e magnetorestritivos (Srinivasan & McFarland, 2000), suas principais propriedades incluem o efeito memória de forma (EMF) e a superelasticidade (SE).

O EMF ocorre por transformação cristalina térmica, permitindo à liga recuperar sua forma original após deformação em baixa temperatura. Já a SE manifesta-se acima da temperatura Af, com a reversão da martensita à austenita ao aliviar a carga. As temperaturas críticas (Ms, Mf, As e Af), descritas por Otsuka & Wayman (1998) e Lagoudas (2008), definem as condições para a presença de cada fase.

2.4.1. EFEITO DE SUPERELASTICIDADE

A superelasticidade, ou pseudoelasticidade, é a capacidade das LMFs de recuperar grandes deformações apenas com o descarregamento. Esse efeito isotérmico, associado à transformação martensítica induzida por tensão, ocorre acima da temperatura Af. Por exemplo, a liga Ni-Ti pode suportar deformações elásticas de até 8%, enquanto metais convencionais limitam-se a menos de 1% (Lecce & Concilio, 2015). Durante o carregamento, a austenita se transforma em martensita não maclada, e ao descarregar, a martensita retorna à austenita, restaurando a deformação. O SE é representado na Figura 53.

Figura 5. Superelasticidade.



Fonte: Lecce & Concilio, (2015)

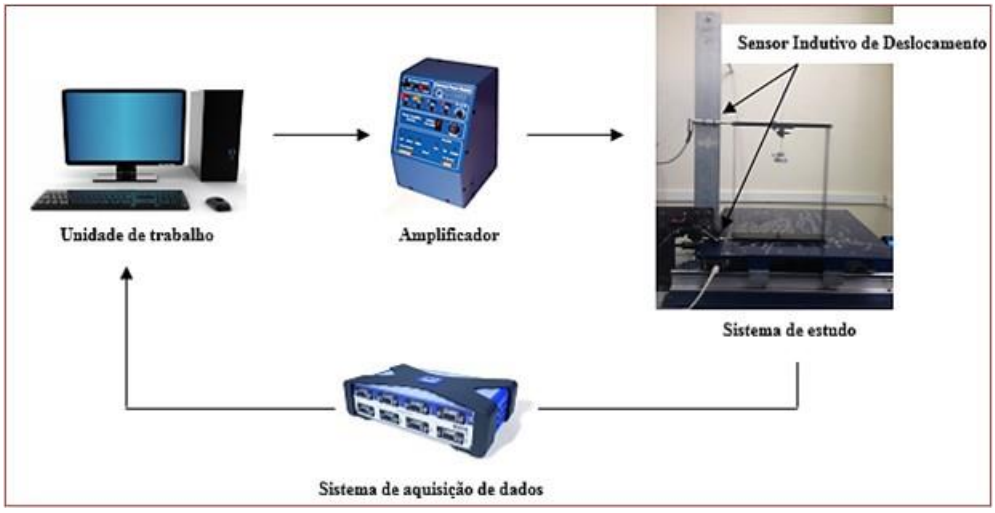
Esse comportamento gera uma histerese de tensão mecânica, que representa a diferença entre a energia aplicada para deformar o material e a energia devolvida ao sistema. Quanto maior a histerese, maior a energia dissipada por ciclo. Tal característica torna as LMFs úteis em dispositivos absorvedores dinâmicos (OLIVEIRA, 2014).

3. MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi realizado na Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica (UAEM/UFCG) com o apoio do Laboratório de Vibração (LVI). O dispositivo experimental simula um pórtico estrutural (sistema primário) com um sistema pendular montado em seu piso superior (sistema secundário). Os resultados analíticos serão apresentados na versão completa do estudo. Os principais equipamentos utilizados incluem:

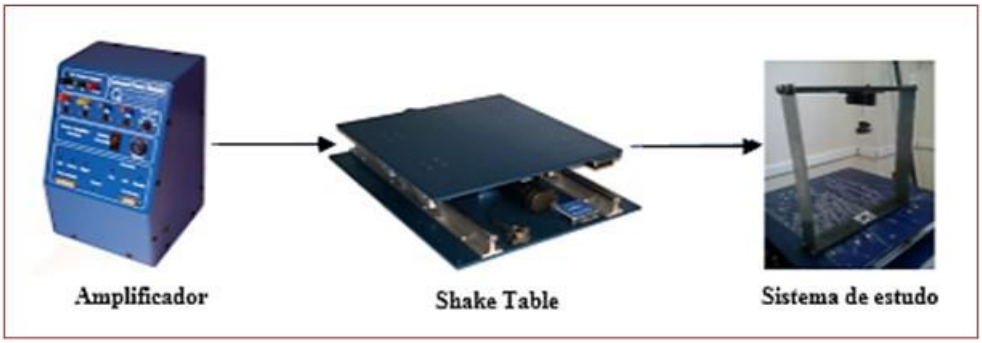
- Amplificador UPM 180-25B;
- Shake Table II Quanser (27,2 kg, servomotor de 400 W, acelerômetro com 9,81 $m/s^2/V$);
- Sensor Indutivo de Deslocamento WI/10MM-T;
- Sistema de aquisição de dados QuantumX MX840B (8 canais);
- Computador.

Figura 6 - Cadeia de medição utilizados no experimento.



Fonte - Autoria Própria.

Figura 7 - Cadeia de instrumentação para análise de movimento de base.

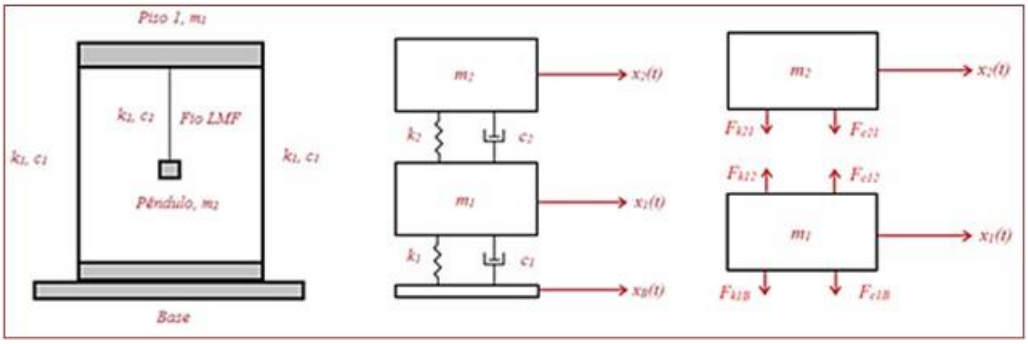


Fonte: Autoria Própria.

3.1. MODELAGEM ANALÍTICA

A lei que rege o sistema apresentado na Figura 8 é a Segunda Lei de Newton. Conforme aplicada ao sistema desse trabalho, obtiveram-se as expressões mostradas a seguir:

Figura 8 -4 DCL do pórtico em 2 GDL.



Fonte - Autoria própria

$$\sum F = m_1\ddot{x}_1 \rightarrow -F_{c1B} - F_{k1B} - F_{c12} - F_{k12} = m_1\ddot{x}_1$$

$$\sum F = m_2\ddot{x}_2 \rightarrow -F_{c21} - F_{k21} = m_2\ddot{x}_2$$

Assumindo as condições iniciais do sistema como sendo $x_1(0) = x_2(0) = 0$ e $\dot{x}_1(0) = \dot{x}_2(0) = 0$. E sabendo que $F_1(s) = c_1 s X_B(s) + k_1 X_B(s)$ e $F_2(s) = 0$, temos:

$$[s^2X_1(s)m_1 + sX_1(s)(c_1 + c_2) + X_1(s)(k_1 + k_2)] + [-sX_2(s)c_2 - X_2(s)k_2] = F_1(s)$$

$$[s^2X_2(s)m_2 + sX_2(s)c_2 + X_2(s)k_2)] + [-sX_1(s)c_2 - X_1(s)k_2] = 0$$

Como o amortecimento c_1 é muito pequeno, podemos desprezá-lo e multiplicar essas equações pela rigidez do sistema, k_1, a fim de transformar a quantidade de força de excitação em amplitude de excitação, obtendo assim as funções de transferência adimensionais do sistema.

$$H_1(s) = \frac{X_1(s)k_1}{F_1(s)} = \frac{s^2m_2k_1 + sc_2k_1 + k_2k_1}{\det(A)}$$

$$H_2(s) = \frac{X_2(s)k_1}{F_1(s)} = \frac{-sc_2k_1 - k_2k_1}{\det(A)}$$

Substituindo a variável de Laplace s por iω, onde i é a unidade imaginária e ω a frequência excitadora, podemos encontrar a FRF (Frequency Responde Function) do sistema.

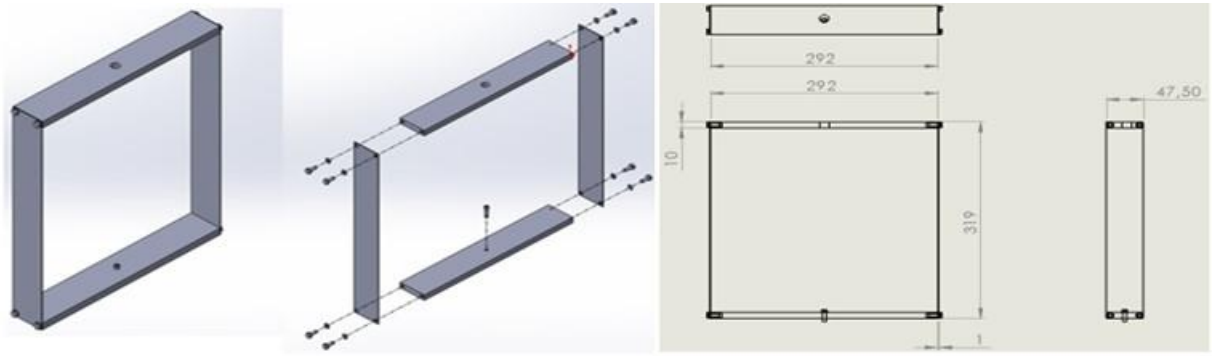
3.2. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

3.2.1. CONCEPÇÃO E MODELO ESTRUTURAL

O modelo estrutural foi desenvolvido em ambiente computacional com o objetivo de se determinar as dimensões geométricas do sistema. Para desenho técnico do modelo foi utilizado o software SolidWorks®.

Na Figura 95 é visualizado o pórtico com suas respectivas cotas, usadas nas equações da modelagem analítica, juntamente com a vista explodida da estrutura.

Figura 9 - Desenho técnico simplificado do pórtico. a) Vista isométrica do Pórtico. b) Vista frontal e cotas.



(a) (b)

Fonte: Autoria própria

O modelo foi constituído com barras de aço ao carbono do tipo 1020 para composição do pavimento, chapas retangulares de aço inoxidável do tipo 304 para composição das colunas, e como elementos de ligação, parafusos M6 de aço comum. A Tabela 5 lista as quantidades, propriedades e dimensões dos componentes utilizadas na fabricação da estrutura.

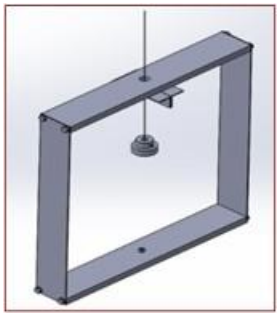
Tabela 1. Descrição dos componentes utilizados na construção da estrutura.

DESCRIÇÃO	*DIMENSÕES (mm)*	*E (GPa)*	*MASSA (kg)*	*QUANTIDADE (Und.)*
Barra de aço 1020	*292 x 47,5 x 10*	*200*	*0,9838*	*2*
Chapa de Aço inox 304	*319 x 47,5 x 1*	*193*	*0,190*	*2*
Arruelas	*Ø6*	*200*	*0,00157*	*8*
Parafusos M6	*Ø6*	*200*	*0,00266*	*8*
Parafuso Allen (3/4")	*9,5 x 15,5*	*200*	*0,004*	*1*

Fonte: Autoria própria

Neste trabalho, utilizou-se um pêndulo com fio de LMF acoplado à massa, formando o elemento responsável pela absorção de vibrações. O fio, com efeito superelástico à temperatura ambiente, acrescenta amortecimento à estrutura devido à pseudoelasticidade termomecânica das LMFs. A montagem do sistema é apresentada na Figura 6.

Figura 107. Vista isométrica do sistema composto do pórtico mais o pêndulo.



Fonte: Autoria própria

Tabela 2. Descrição dos componentes utilizados na construção do absorvedor.

DESCRIÇÃO	*DIMENSÕES (mm)*	*E (GPa)*	*MASSA (kg)*	*QUANTIDADE (Und.)*
Cantoneira	*68 x 27 x 27*	*8.10¹⁰*	*83,22*	*2*
Massa (pêndulo)	*Ø30 x 10*		*0,0807*	*1*
Parafuso	*9,5 x 15,5*	*200*	*0,004*	*3*
Porca	*6*	*200*	*0,0025*	*3*

Fonte: Autoria própria

3.2.2. RIGIDEZ ESTRUTURAL DO SISTEMA

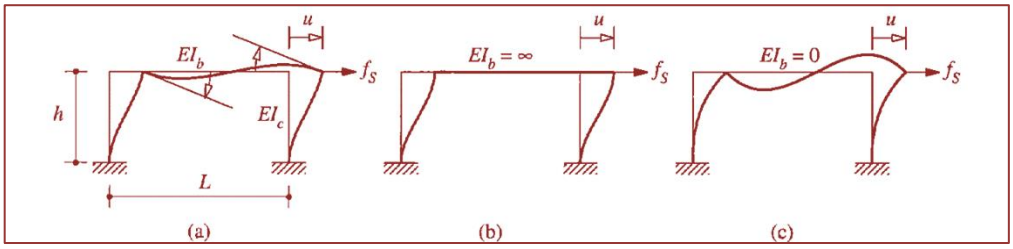
Para o sistema da Figura 810 semelhante ao pórtico utilizado neste trabalho, com comprimento a L, altura h, módulo de elasticidade E e momento de inércia I_b para a massa principal e I_c para as colunas de sustentação do pórtico ao qual estão fixadas à base. Pode-se encontrar a rigidez k através de dois casos possíveis: 1º caso – Sistema de massa principal rígido, logo a sua rigidez a flexão tende ao infinito ($EI_b = \infty$, Figura 9. b) e a equação é definida por:

$$k = \sum_{Colunas} 12\frac{EI_c}{h^3} = 24\frac{EI_c}{h^3}$$

2º caso – Sistema de massa principal sem rigidez ($EI_b = 0$, Figura 11. c):

$$k = \sum_{Colunas} 3\frac{EI_c}{h^3} = 6\frac{EI_c}{h^3}$$

Figura 11 - Diagrama de corpo livre de um pórtico sujeito à força lateral fs.



Fonte: CHOPRA, (1995).

Como a massa principal do pórtico não sofre deformação devido a força lateral f_s, será adotada a equação do 1º caso para realizar os cálculos de rigidez equivalente das colunas do pórtico, ao qual elas podem ser representadas por um sistema de molas em paralelo sob ação de uma força W e alongamento (δ_1) respectivamente. A Figura 10 representa um sistema deste tipo sendo a constante elástica teórica é definida por:

$$k_{eq} = k_1 + k_2$$

Desta forma, diz que "k_1" refere-se à rigidez imposta pela coluna de um dos lados da estrutura e "k_2" referindo-se a rigidez da coluna referente ao outro lado e "k_{eq}" sendo a rigidez equivalente teórica que representa todo o sistema.

3.2.3. CARACTERIZAÇÃO DO FIO Ni-Ti

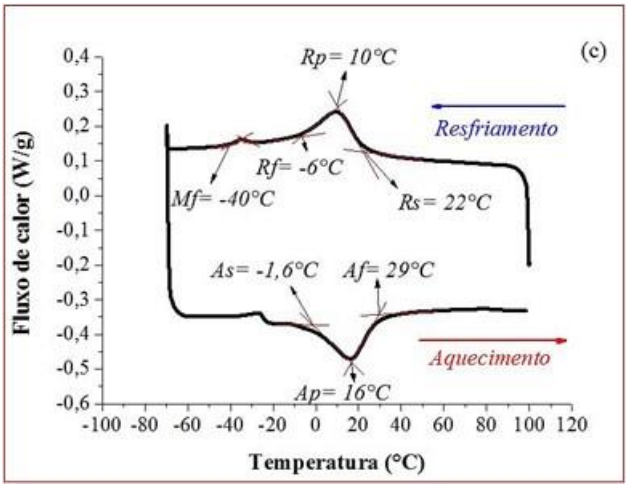
O fio Ni-Ti fornecido pelo LAMEA (Laboratório de Materiais e Estruturas Ativas) da Universidade Federal de Campina Grande. A Tabela 6 mostra os dados fornecidos sobre o fio:

Tabela 3. Dados do Fio Ni-Ti.

Diâmetro (D)	0,7 mm
Área (A)	0,385 mm²
Rigidez longitudinal (k_l)	842,142 N/mm
Comprimento ensaiado (L_e)	20 cm

Fonte: LAMEA

Figura 1211. Curva de temperatura de transformação do fio Li-Ti.



Fonte: LAMEA

Através dos dados apresentados acima, podemos obter o módulo de elasticidade (E) do fio pela expressão:

$$E = k_l \frac{L_e}{A}$$

A rigidez transversal (de flexão) do fio deverá seguir a proporção da equação 6. O comprimento ideal para o absorvedor será encontrado através desse valor de rigidez transversal utilizando a expressão a seguir:

$$k_1 = \frac{3EI}{l^3}$$

Que reorganizada em função de l fica:

$$l = \sqrt[3]{\frac{3EI}{k_1}}$$

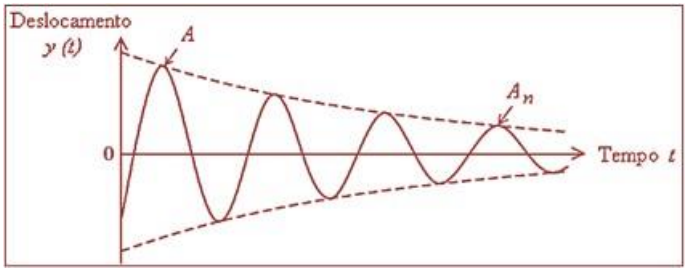
3.2.4. ESTIMATIVA DOS AMORTECIMENTOS ESTRUTURAL E DO FIO Ni-Ti

Os métodos de determinação do amortecimento são diversos e a escolha depende principalmente da faixa de amortecimento e da frequência de vibração. Os mais comuns, o do decremento logarítmico e o da meia banda, como vistos com mais detalhes a seguir, foram utilizados para estimar os amortecimentos envolvidos nesse trabalho.

3.2.5. MÉTODO DO DECREMENTO LOGARÍTMICO

O decremento logarítmico, obtido pela razão entre duas amplitudes sucessivas em vibração livre, mede a taxa de redução logarítmica do movimento após um impulso, devido à transferência ou absorção de energia. É o método mais comum para calcular o amortecimento. Em um sistema oscilatório com um grau de liberdade e amortecimento viscoso, a resposta ao impulso decai ao longo do tempo., como representada na Figura 13.

Figura 12. Resposta ao impulso para um oscilador simples.



Fonte: RAO, (2011)

O decremento logarítmico é calculado através da Equação (17).

$$\delta = \frac{1}{n} ln\left(\frac{A}{A_n}\right) \quad (17)$$

Em que n é a posição da enésima amplitude, A e An são as amplitudes do oscilador.

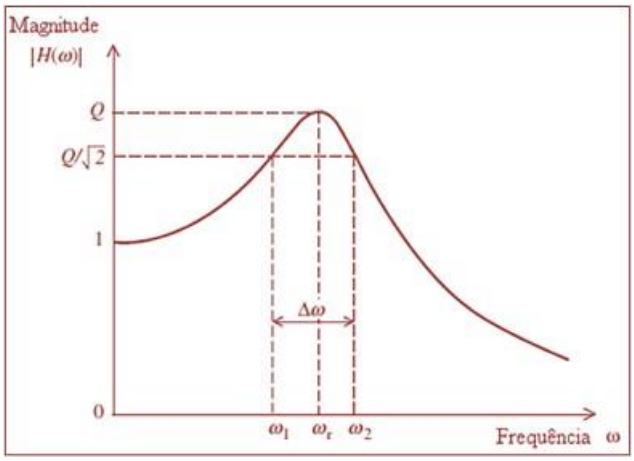
O fator de amortecimento é calculado pela Equação (18), que é válida para pequenos valores de amortecimento.

$$\xi = \frac{\delta}{\sqrt{(2\pi)^2 + \delta^2}} \quad (18)$$

3.2.6. MÉTODO DA LARGURA DE BANDA

Neste método a medida do amortecimento é baseada na resposta da frequência. A largura da banda (a meia potência) é definida como a largura da curva da resposta de frequência quando a magnitude (Q) é $(1/\sqrt{2})$ vezes o valor do pico.3 Este valor é denotado por Δω, como pode ser visto pela Figura 13.

Figura 144. Método da largura de banda para determinação do amortecimento em um sistema com um grau de liberdade.



Fonte: Inman, (2001)

O valor de Δω pode ser relacionado com o amortecimento da seguinte forma:

$$\Delta\omega = \omega_2 - \omega_1 = 2\xi\omega_r \quad (19)$$

E portanto, o amortecimento pode ser estimado através da largura de banda, usando a relação:

$$\xi = \frac{1}{2}\frac{\Delta\omega}{\omega_r} \quad (20)$$

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. RESULTADOS ANALÍTICOS

A Tabela 4 apresenta os cálculos realizados a partir dos dados obtido no desenho da Figura 15.

Tabela 4. Tabela Parâmetros de rigidez estrutural analítica do sistema.

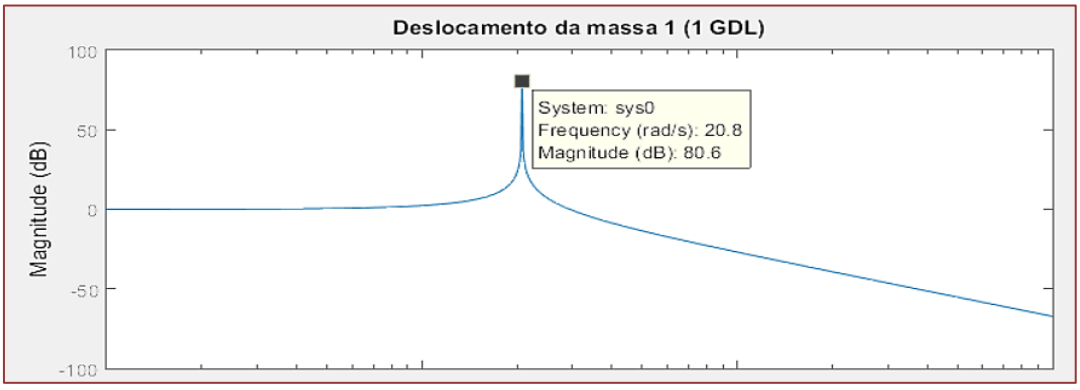
DESCRIÇÃO	VALOR
MOMENTO DE INÉRCIA (I_c)	$3{,}95833.10^{-12}\ m^4$
RIGIDEZ DA COLUNA 1 (k_1)	$260{,}925\ N/m$
RIGIDEZ DA COLUNA 2 (k_2)	$260{,}925\ N/m$
RIGIDEZ EQUIVALENTE (k_{eq})	$521{,}85\ N/m$

Fonte: Autoria própria

4.1.1. ANÁLISE MODAL ANALÍTICA DO SISTEMA

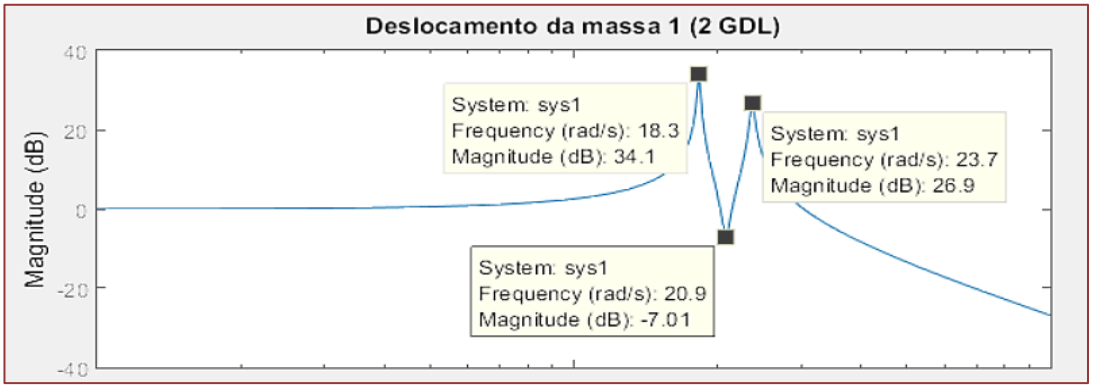
Para determinação dos valores analíticos das frequências naturais da estrutura com 1 GDL submetida à vibração livre e não amortecida, assim como a estrutura com 2 GDL amortecida pelo fio LMF, foi gerado os gráficos das Figuras 15 e 16 e ao qual são exibidas as curvas de FRF's analíticas do sistema obtidas a partir das funções de transferência modeladas pela teoria das transformadas de Laplace, já descritas neste trabalho.

Figura 15. Gráfico do deslocamento do sistema com 1 GDL.



Fonte: Autoria própria.

Figura 16. Gráfico do deslocamento do sistema com 2 GDL.



Fonte: Autoria própria.

4.2. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

4.2.1. RESPOSTA AO IMPACTO DE MARTELO

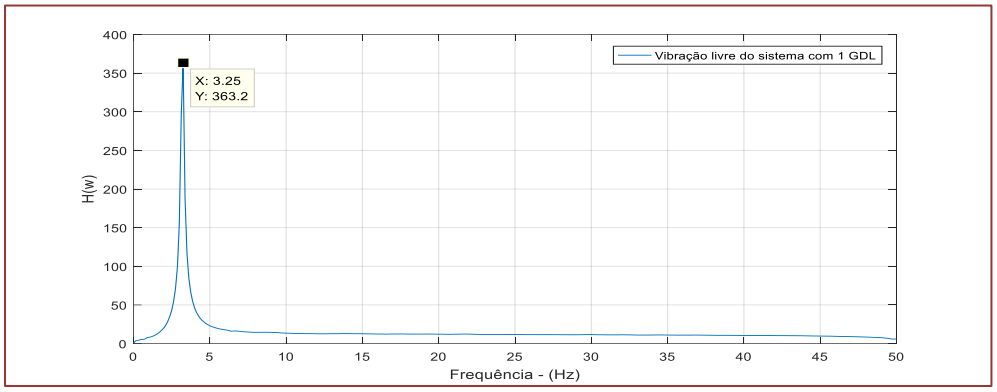
Os experimentos realizados em vibração livre apresentaram resultados das respostas de aceleração do sistema em função do tempo, com um range de 0 a 8 segundos de captação de sinal.

Os gráficos de espectro de frequência que serão analisados, representam um "guia" das amplitudes de aceleração que compõem o movimento do pórtico, possibilitando a verificação e análise vibracional do pórtico e encontrando assim, as suas frequências naturais.

A Figura 17 apresenta a FRF do sistema de 1 GDL. Esta função foi conseguida pela divisão do sinal de saída de aceleração e sinal de entrada de força, a partir de uma função pré-definida no analisador dinâmico de sinais. Os picos de amplitude de resposta mostram o comportamento do pórtico à força aplicado pelo martelo.

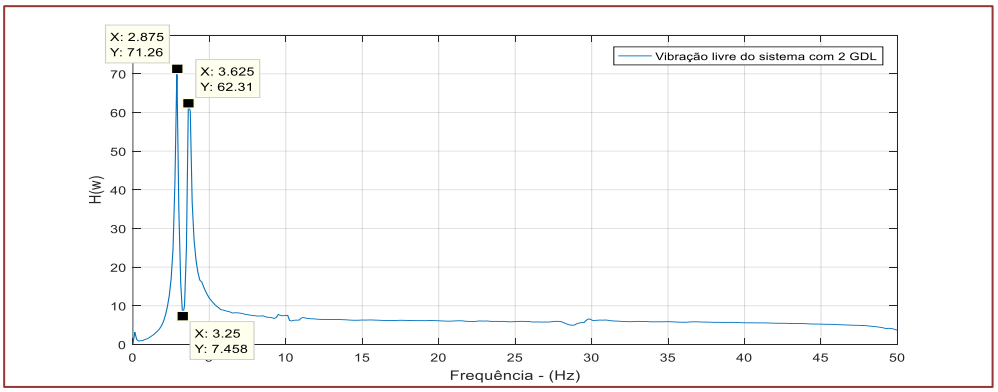
Já o gráfico da Figura 1815 denota a FRF do sistema de 2 GDL. Neste gráfico é notável o comportamento dinâmico da estrutura, podendo ser visualizado os picos de amplitude do sistema e a região de antirressonância para as configurações do caso pêndulo atenuador.

Figura 17 - FRF do sistema de 1 GDL.



Fonte: Autoria própria.

Figura 18 - FRF do sistema de 2 GDL.



Fonte: Autoria própria.

Nas Tabelas 57 e 68 apresentam-se os valores das frequências naturais obtidas, onde é possível verificar uma pequena variação nas frequências quando comparados com os medidos a partir do experimento. Obteve-se um erro relativo de no máximo 4% para as frequências naturais, validando a eficiência da modelagem matemática na caracterização de sistemas dinâmicos deste tipo.

Tabela 5 -9 Frequências naturais analíticas da estrutura de 1 GDL.

FREQUÊNICIA NATURAIS	EXPERIMENTAL	FRF's (LAPLACE)	ERRO RELATIVO (%)
1º Frequência natural (Hz)	*3,25*	*3,31*	*1,81*

Fonte: Autoria própria.

Tabela 6 - Frequências naturais analíticas da estrutura de 2 GDL.

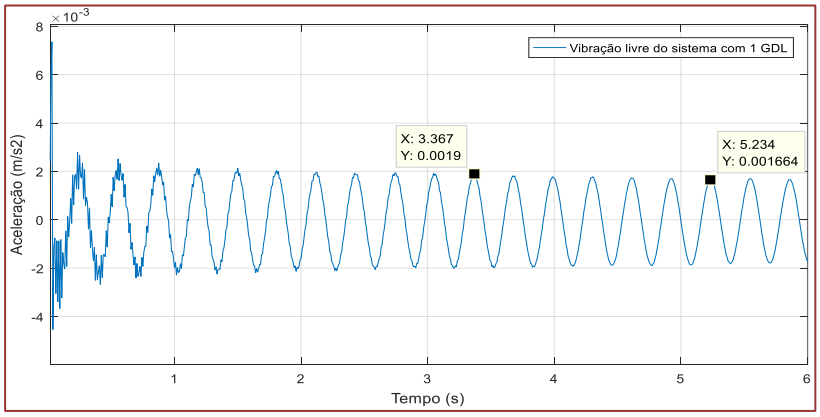
FREQUÊNICIA NATURAIS	EXPERIMENTAL	FRF's (LAPLACE)	ERRO RELATIVO (%)
1º Frequência natural (Hz)	*2,87*	*2,91*	*1,37*
2º Frequência natural (Hz)	*3,62*	*3,77*	*3,97*

Fonte: Autoria própria.

4.2.2. ESTIMATIVA DO AMORTECIMENTO PELA RESPOSTA EM VIBRAÇÃO LIVRE DE 1 GDL

No gráfico da figura 1916 é possível observar a resposta de vibração livre no tempo obtido nos testes com o martelo de impacto.

Figura 19 -17 Resposta no tempo da estrutura em vibração livre com martelo de impacto. (1 GDL).



Fonte: Autoria própria.

Através do gráfico da figura 1918 foi extraído o valor de dois picos para cálculo de amortecimento pelo método de decremento logarítmico. Foram escolhidos os picos número 10 e 25, por serem distantes, dando um resultado mais preciso, e fora da região

inicial de interferência do martelo de impacto. A tabela 710 mostra os valores para esses picos extraídos do gráfico da figura 1919.

Tabela 711. Valores de picos do ensaio de vibração livre de 1 GDL.

Pico nº	11	17
Valor do pico (m/s^2)	0,0019	0,00166

Fonte: Autoria própria.

Utilizando esses valores na equação 10, obtemos o decremento logarítmico do sinal:

$$\delta = 0{,}022105$$

Com esse valor de decremento, obtemos o valor aproximado do amortecimento do sistema de 1GDL:

$$\xi = 0{,}003518$$

Comparando esse valor obtido do amortecimento do sistema com a faixa de valores da tabela 12, vemos que esse valor está dentro da faixa do amortecimento do aço, mostrando que o resultado obtido foi uma boa aproximação.

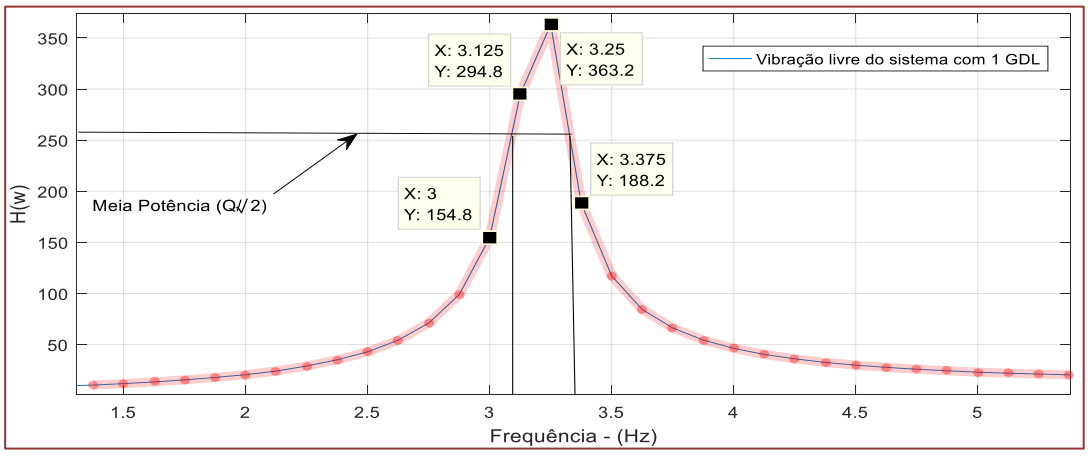
O amortecimento equivalente desse sistema é obtido através da expressão:

$$c = 2\xi\sqrt{km} = 2x0{,}003518x\sqrt{518{,}5x1{,}2} = 0{,}1755\ N.s/m$$

4.2.3. ESTIMATIVA DO AMORTECIMENTO PELA FRF DE 1 GDL

No gráfico da figura 2020 é possível observar o método de Largura de banda para calcular o amortecimento envolvido na RFR do sistema em vibração livre obtida nos testes com o martelo de impacto.

Figura 2021 - Método de Largura de Banda na FRF da estrutura em vibração livre com martelo de impacto. (1 GDL).



Fonte: Autoria própria.

Através desse gráfico extraímos o valor da amplitude em ressonância (Q) de 363,2. O valor de meia potência ($Q/\sqrt{2}$) será então de 256,8 (linha horizontal indicada no gráfico da figura 22). Esse valor de meia potência está ligado a duas frequências na FRF que podem ser encontradas por interpolação dos pontos mais próximos desse valor, como indicado nas tabelas 813 e 9.

Tabela 814 - Ponto de meia potência anterior.

	H(ω)	**Frequência (Hz)**
Valor de meia potência anterior	256,8	ω1
Ponto anterior	154,8	3
Ponto posterior	294,8	3,125

Fonte: Autoria própria.

Tabela 9 - Ponto de meia potência posterior.

	H(ω)	**Frequência (Hz)**
Valor de meia potência posterior	256,8	ω2
Ponto anterior	363,2	3,25
Ponto posterior	188,2	3,375

Fonte: Autoria própria.

Interpolando os valores das tabelas 4 e 5 encontramos os valores das frequências ω_1 e ω_2 relacionadas ao valor de meia potência:

$$\omega 1 = 3{,}091 \text{ rad/s}$$

$$\omega 2 = 3{,}326 \text{ rad/s}$$

Com esses valores podemos encontrar a largura de banda:

$$\Delta\omega = \omega 2 - \omega 1 = 0{,}235 \text{ rad/s}$$

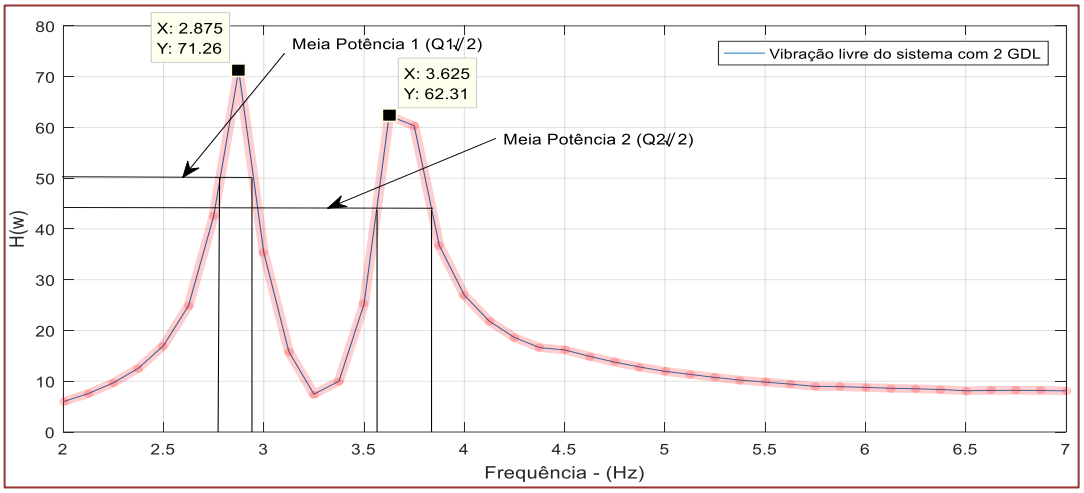
Assim estimamos o valor do fator de amortecimento do sistema com a equação 20:

$$\xi = 0{,}03614$$

4.2.4. ESTIMATIVA DOS AMORTECIMENTOS PELA FRF DE 2 GDL

No gráfico da Figura 2123 é possível observar o método de Largura de banda para calcular os amortecimentos envolvidos na RFR do sistema com o absorvedor (2 GDL) em vibração livre obtida nos testes com o martelo de impacto.

Figura 21 - Método de Largura de Banda na FRF da estrutura em vibração livre com martelo de impacto. (2 GDL).



Fonte: Autoria própria.

Primeiramente extraímos nesse gráfico o valor da amplitude em ressonância do modo 1 ($Q1$) de 71,26. O valor de meia potência ($Q/\sqrt{2}$) será então de 50,39 (primeira linha horizontal indicada no gráfico da Figura 24). Esse valor de meia potência está ligado a duas frequências na FRF que podem ser encontradas por interpolação dos pontos mais próximos desse valor, como indicado nas Tabelas 10 e 11.

Tabela 1015 - Ponto de meia potência anterior (Modo 1).

	H(ω)	Frequência (Hz)
Valor de meia potência anterior	50,39	ω1,1
Ponto anterior	42,48	2,75
Ponto posterior	71,26	2,875

Fonte: Autoria própria.

Tabela 11 - Ponto de meia potência posterior (Modo 1).

	H(ω)	Frequência (Hz)
Valor de meia potência posterior	256,8	ω2,1
Ponto anterior	71,26	2,875
Ponto posterior	35,4	3

Fonte: Autoria própria.

Interpolando os valores das Tabelas 10 e 11 encontramos os valores das frequências ω1 e ω2 relacionadas ao valor de meia potência:

$$\omega 1{,}1 = 2{,}784 \text{ rad/s}$$

$$\omega 2{,}1 = 2{,}948 \text{ rad/s}$$

Com esses valores podemos encontrar a largura de banda:

$$\Delta\omega 1 = \omega 2{,}1 - \omega 1{,}1 = 0{,}164 \text{ rad/s}$$

Assim estimamos o valor do fator de amortecimento do sistema com a equação 20:

$$\xi_1 = 0{,}02852$$

Agora faremos o mesmo procedimento para o pico do modo 2 no gráfico da Figura 2125. Extraímos o valor da amplitude em ressonância do modo 2 ($Q2$) de 62,31. O valor de meia potência ($Q/\sqrt{2}$) será então de 44,06 (segunda linha horizontal indicada no gráfico da Figura 26). Esse valor de meia potência está ligado a duas frequências na FRF que podem ser encontradas por interpolação dos pontos mais próximos desse valor, como indicado nas Tabelas 1216 e 13.

Tabela 13 - 17Ponto de meia potência anterior (Modo 2).

	H(ω)	Frequência (Hz)
Valor de meia potência anterior	44,06	ω1,2
Ponto anterior	25,21	3,5
Ponto posterior	62,31	3,625

Fonte: Autoria própria.

Tabela 14 -18 Ponto de meia potência posterior (Modo 2).

	H(ω)	Frequência (Hz)
Valor de meia potência posterior	256,8	ω2,2
Ponto anterior	60,32	3,75
Ponto posterior	36,77	3,875

Fonte: Autoria própria.

Interpolando os valores das Tabelas 12 e 13 encontramos os valores das frequências ω1 e ω2 relacionadas ao valor de meia potência:

$$\omega 1{,}2 = 3{,}564 \text{ rad/s}$$

$$\omega 2{,}2 = 3{,}836 \text{ rad/s}$$

Com esses valores podemos encontrar a largura de banda:

$$\Delta\omega 1 = \omega 2{,}2 - \omega 1{,}2 = 0{,}272 \text{ rad/s}$$

Assim estimamos o valor do fator de amortecimento do sistema com a equação 20:

$$\xi_2 = 0{,}03752$$

5. CONCLUSÕES

Neste trabalho, foram encontrados parâmetros modais analíticos e experimentais de frequências naturais, rigidez e estimativas de amortecimento de um sistema do tipo pórtico com 1 GDL (referência) e 2 GDL (quando incorporado um pêndulo absorvedor), a partir da excitação impulsiva lateral.

Foi verificado uma boa aproximação dos resultados experimentais das frequências naturais, quando comparado com a simulação realizada através de rotinas no Matlab®, obtendo-se erros da ordem de 0.83% para a primeira e de 1,88% para a segunda frequência natural da estrutura.

Foi realizada uma análise experimental para a estrutura sem e com a incorporação de fios LMF através de um pêndulo e verificando as alterações em parâmetros importantes, como as variações de rigidez e amortecimento, para assim poder realizar os ajustes necessários para um bom desempenho do sistema absorvedor.

Pôde-se observar uma região de antirressonância gerado pelo ADV, permitindo que o sistema principal seja excitado em sua frequência natural original e não sofra nenhum dano devido a vibrações.

REFERÊNCIAS

[1] CHOPRA, Anil K. Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering. 4. ed. New Jersey: Pearson Prentice Hall, 2012.

[2] INMAN, Daniel J. Engineering Vibration. 5th ed, Printice Hall, 2021.

[3] TADOKORO, Y.; et al. Recent advances in shape memory alloys for structural applications. Materials Science and Engineering: A, v. 790, p. 139679, 2020.

[4] MATSUMOTO, T.; SAITO, T. Dynamic vibration control using shape memory alloys. *Journal of Sound and Vibration*, v. 484, p. 115590, 2021.

[5] SHARMA, S.; KAUR, R. Performance evaluation of shape memory alloys as dynamic dampers. *Smart Materials and Structures*, v. 31, n. 4, p. 045004, 2022.

[6] PARK, J.; et al. Experimental and numerical studies on the use of shape memory alloys in vibration control. *Engineering Structures*, v. 263, p. 113520, 2023.

[7] LI, Y.; et al. Applications of shape memory alloys in engineering: a review. *Journal of Materials Research and Technology*, v. 18, p. 1101-1117, 2023.

[8] ZHANG, H.; LIU, W. Innovative vibration control methods using smart materials. *International Journal of Mechanical Sciences*, v. 207, p. 106866, 2023.

[9] AMARANTE, F. P., & CISMASIU, C. 2011. Bridge hinge-restrainers built up of NiTi superelastic shape-memory alloys. Centro de Investigação em Estruturas e Construção - UNIC, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Quinta da Torre, 2829-516 Caparica, Portugal. pp 1-12.

[10] LECCE, L.; CONCILIO, A. (Eds). Shape Memory Alloy Engineering: For Aerospace, Structural and Biomedical Application. Elsevier, 2015.

[11] MORAES, Y. J. O. Análise Dinâmica Aplicada ao Controle Passivo de Vibrações em Estrutura do Tipo Pórtico Incorporando Minimolas Superelásticas de Nitinol. Campina Grande, PB: UFCG, 2017. 114 f. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Campina Grande, 2017.

Capítulo 7

Calibração dos parâmetros de modelo de dano micromecânico para aço de vaso de pressão por elementos finitos e planejamento experimental

Gabriel de Castro Coêlho[1]
Marco Antonio dos Santos[2]

Resumo: A previsão do comportamento de fratura dúctil de materiais e estruturas de engenharia tem sido uma grande conquista para a avaliação da integridade estrutural, e o uso do modelo micromecânico GTN por meio de simulações FE é uma das ferramentas mais importantes responsáveis por isso. A determinação dos parâmetros do modelo GTN, no entanto, ainda é objeto de grande debate no que diz respeito a uma metodologia concisa. Aqui, uma tentativa de calibrar tais parâmetros é executada utilizando planejamento de experimental e seguindo a otimização usando a metodologia de superfície de resposta. Os resultados obtidos estão em excelente concordância com os resultados experimentais de um teste de tração.

Palavras–chave: elementos finitos; fratura dúctil; mecânica do dano; modelo GTN,

[1] Docente da Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica, – CCT – UFCG
[2] Docente da Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica, – CCT – UFCG

1. INTRODUÇÃO

A fratura dúctil é o mecanismo de falha mais comum dos materiais metálicos em temperatura ambiente (FRANÇOIS; PINEAU; ZAOUI, 2013). Em uma abordagem computacional, é possível prever o comportamento da fratura dúctil de materiais usando tanto modelos de mecânica do dano contínuo quanto com a modelagem de micromecânica de dano, ambas baseadas em conceitos da mecânica do contínuo (KACHANOV, 1986). Entre os vários modelos micromecânicos focados na nucleação, crescimento e coalescência de vazios (micromecanismo típico da fratura dúctil em metais), os mais aplicados são os baseados no modelo de Gurson, devido à sua versatilidade (PINEAU; PARDOEN, 2007), uma vantagem que levou ao seu amplo uso em aplicações práticas de engenharia e pesquisa.

GURSON, (1977) derivou um critério de falha baseado em dano e critério de escoamento, ligando a resposta macroscópica do material à sua fração volumétrica de vazios e à evolução da mesma durante carregamento. O modelo foi modificado ao longo dos anos, de tal maneira que uma destas variações, o modelo de Gurson-Tvergaard-Needleman (modelo GTN), desenvolvido por TVERGAARD; NEEDLEMAN, (1984), tem sido o mais utilizados. Neste modelo, após atingir o valor crítico de fração volumétrica, esta é subitamente aumentada para simular uma queda repentina da capacidade de suportar carregamentos associada com a fratura dúctil:

$$\Phi^{\mathrm{GTN}} = \left(\frac{\bar{\sigma}}{\bar{\sigma}_f}\right)^2 + 2q_1 f^* \cosh\left(\frac{3}{2} q_2 \frac{\sigma_m}{\bar{\sigma}_f}\right) - 1 - q_3 f^{*2} \tag{11}$$

onde $\bar{\sigma}_f$ é a tensão de fluxo plástico instantânea necessária para continuar a deformar plasticamente o material (*flow stress*); q_1, q_2 e $q_3 = q_1^2$ são parâmetros introduzidos por TVERGAARD, (1981) para levar em conta instabilidades por bandas de cisalhamento. Ainda:

$$f^* = \begin{cases} f\,, & f \le f_c \\ f_c + \frac{f_u^* - f}{f_f - f_c}(f - f_c)\,, & f_c < f < f_f \\ f_u^*, & f \ge f_f \end{cases} \tag{12}$$

sendo f_c a fração volumétrica de vazios para coalescência; f_f a fração volumétrica de vazios na falha (fratura final); e f_u^* a fração volumétrica de vazios última de f^* e não tem sentido físico, tal que:

$$f_u^* = \frac{q_1 + \sqrt{q_1^2 - q_3}}{q_3} = \frac{1}{q_1} \tag{13}$$

A equação (2) considera a aceleração da taxa de crescimento do volume de vazios e a rápida queda da capacidade de suportar carregamentos uma vez que $f^* = f_c$, simulando o fenômeno de coalescência neste ponto. Quando $f \ge f_f$, há a falha completa do ponto material.

Ainda, em relação aos fenômenos de nucleação e crescimento de vazios, estes são incluídos à parte no modelo e a evolução do dano ($\dot{f}$) é tal que:

$$\dot{f} = \dot{f}_{cresc,} + \dot{f}_{nuc,} \tag{14}$$

onde a taxa de crescimento, $\dot{f}_{crec}$, é proporcional à taxa de dilatação plástica volumétrica:

$$\dot{f}_{cresc,} = 3(1 - f)d\varepsilon_m^P \tag{15}$$

e $d\varepsilon_m^P$ é a componente hidrostática do incremento de deformação plástica, que se relaciona ao critério de escoamento pela dita regra da normalidade, tal que:

$$d\varepsilon_m^P = d\lambda \frac{\partial \Phi}{\partial \sigma_m} \tag{16}$$

onde $d\lambda$ é uma constante positiva que varia ao longo do caminho de carregamento e relaciona os incrementos de deformação plástica às tensões de desvio.

Já a taxa de nucleação, $\dot{f}_{nuc,}$, pode ser controlada pela deformação (*strain-controlled*) ou controlada pela tensão (*stress-controlled*), CHU; NEEDLEMAN, (1980) desenvolveram modelos de taxa de nucleação para ambos os casos baseando-se em distribuição Gaussiana normal:

$$\dot{f}_{nuc,} = A_{N1} d\varepsilon_m^P + A_{N2} d\sigma \tag{17}$$

onde A_{N1} e A_{N2} são intensidades de nucleação devido ao incremento de deformação plástica, $d\varepsilon_m^P$, e o incremento de tensão, $d\sigma = d\bar{\sigma}_f + d\sigma_m$, respectivamente, sendo ambos dependentes da deformação e histórico de carregamento (CHU; NEEDLEMAN, 1980). No critério de nucleação controlado pela deformação, a nucleação de vazios segue uma distribuição normal referente a um valor médio de deformação plástica equivalente média para nucleação, ε_N, e seu desvio-padrão, s_N, tal que:

$$\begin{cases} A_{N1} = \frac{f_N}{s_N\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\bar{\varepsilon}^P - \varepsilon_N}{s_N}\right)^2\right] \\ A_{N2} = 0 \end{cases} \tag{18}$$

e f_N é a fração volumétrica de vazios para nucleação. Em contrapartida, o critério de nucleação pode ser controlado pela tensão, onde a nucleação depende apenas da máxima tensão transmitida através da interface matriz/partícula e esta se dá por uma distribuição normal referente a um valor médio de tensão equivalente para nucleação, σ_N, e seu desvio-padrão, s_N, tal que (Qian; Zhou, 2017):

$$\begin{cases} A_{N1} = 0 \\ A_{N2} = \frac{f_n}{s_N\sigma_e\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\sigma_n - \sigma_N}{s_N\sigma_e}\right)^2\right] \end{cases} \tag{19}$$

e $\sigma_n = \bar{\sigma}_f + \sigma_m$,

O modelo GTN é aplicado em conjunto com pacotes comerciais ou particulares para análise com elementos finitos. Este método numérico possui grande aplicação em análises estruturais de tensões e deformações.

Desta forma, existem nove parâmetros a serem determinados, mas ainda não há uma metodologia concisa para definir esses parâmetros. O procedimento mais comum é alterar cada um deles até que se obtenha um ajuste aos resultados experimentais (por exemplo, curva de carga-deslocamento em tração). Este artigo tem como objetivo avaliar a viabilidade de aplicar a metodologia estatística de projeto de experimentos (DoE) e otimização de processos para calibrar os parâmetros dos modelos GTN, usando como referência os resultados obtidos em um teste de tração de um aço para vasos de pressão.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. MATERIAL

O material utilizado foi o aço ASTM A516 Gr. 70, utilizado na fabricação de vasos de pressão. A Tabela 1 resume a composição química obtida por análise térmica,

Tabela 1 – Exemplo de tabela

%C	%Si	%Mn	%P	%S
0,22	0,20	0,97	0,017	0,004

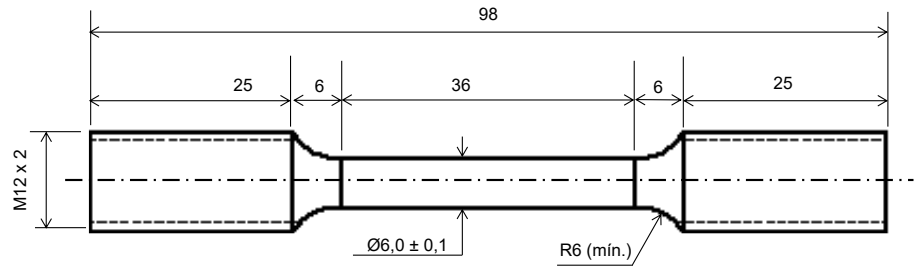
2.2. ENSAIO DE TRAÇÃO

Deste material, foram retirados corpos de prova de tração de acordo com a norma ASTM E8/E8M, mostrado na Figura 1(a), e foram realizados ensaios de tração no Laboratório de Propriedades Mecânicas da UAEM/UFCG. A máquina de ensaio universal utilizada foi a MTS 810 com capacidade de carga máxima de 100 kN. Na Figura 1(b) é mostrado um corpo de prova rompido após o ensaio, A curva de resposta mecânica obtida pelo ensaio é mostrada na Figura 1(c), enquanto as principais propriedades mecânicas obtidas são mostradas na Tabela 2.

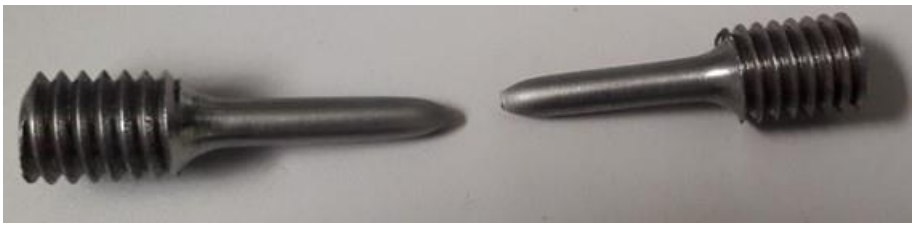
2.3. MODELO EM ELEMENTOS FINITOS

Para as análises por elementos finitos, um modelo bidimensional do corpo de prova foi desenvolvido e é mostrado na Figura 3. Este consiste de elementos bidimensionais quadrilaterais axisimétricos de 4 nós com integração reduzida. A malha no comprimento útil do corpo de prova é refinada, com densidade de elementos com tamanho de 200 x 200 µm, para melhor derivação dos campos de deformação nesta região. A malha tem densidade mais grosseira nas extremidades para redução de custo computacional. As condições de contorno aplicadas são a fixação dos graus de liberdade dos nós contidos em uma das extremidades e aplicação de deslocamento em um ponto remoto acima da outra extremidade, que impõe este deslocamento a todos os nós da outra extremidade pela condição de contorno de amarração (*tie constraint*). A força global é derivada como a resultante das forças neste ponto remoto, Por fim, a última condição de contorno é a de axisimetria aplicada no plano de simetria, permitindo assim que apenas metade do corpo de prova seja modelado, reduzindo o custo computacional do modelo,

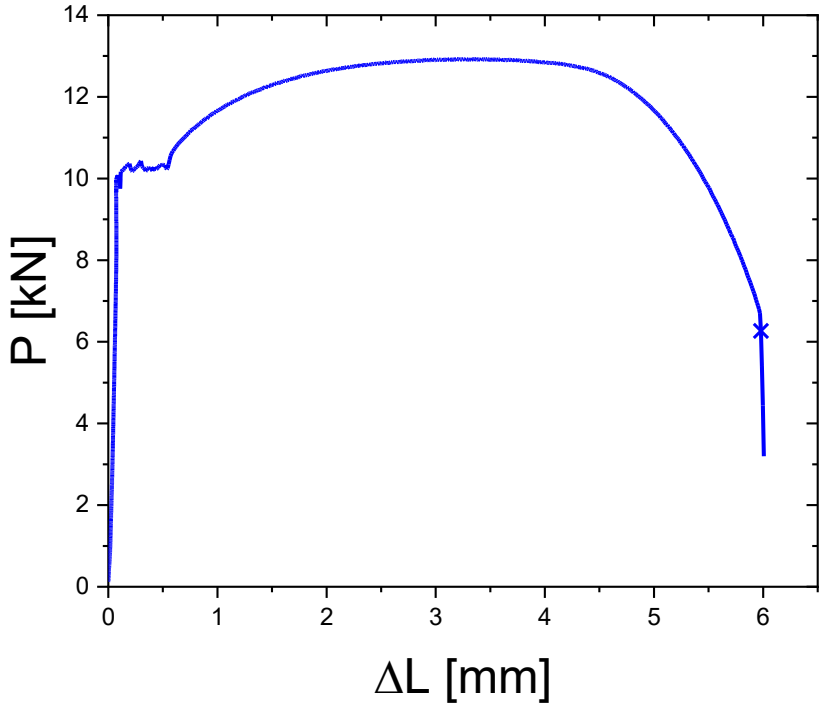
Figura 1 – (a) Desenho do corpo de prova de tração (dimensões em mm). (b) Corpo de prova rompido após ensaio. (c) Curva de Carga *vs* deslocamento inferida pelo ensaio de tração.



(a)



(b)

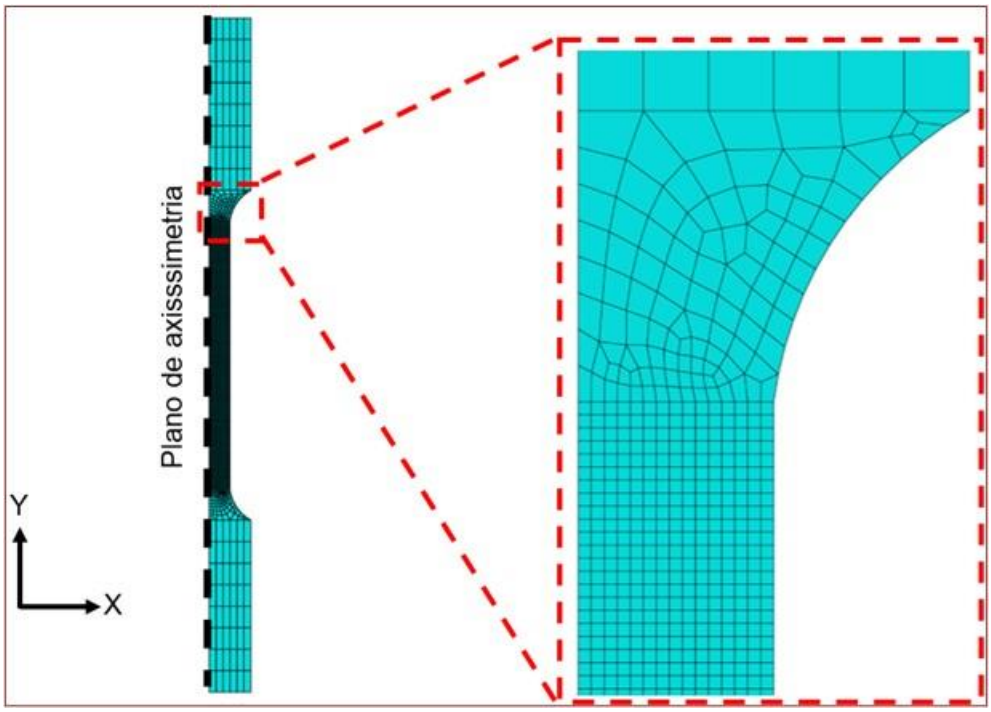


(c)

Tabela 2 – Propriedades mecânicas para o aço ASTM A516 Gr. 70.

Propriedade	Valor	Unidade
Módulo de Elasticidade	215	GPa
Limite de escoamento	357	MPa
Limite de resistência à tração	457	MPa
Limite de ruptura	221	MPa
Deformação na ruptura	0,16611	mm/mm

Figura 3 – Modelo em elementos finitos do corpo de prova.



2.4. PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

O modelo GTN possui nove parâmetros a serem determinados. Destes, quatro foram fixados em valores por não variarem muito seus valores para aços estruturais: $q_1 = 1{,}50$; $q_2 = 1{,}00$; $q_3 = 2{,}25$; $\varepsilon_N = 0{,}3$; $s_N = 0{,}1$. As outras quatro variáveis foram codificadas em dois níveis (superior, +1; inferior, -1) e seus valores foram retirados da literatura, sendo mostrados na Tabela 3.

As respostas, chamadas de variáveis dependentes, são definidas, tal que:

$$R_1 = \left|\Delta L_{exp}^{max} - \Delta L_{num}^{max}\right| \quad (20)$$

$$R_2 = \left|P_{exp}^{max} - P_{num}^{max}\right| \quad (21)$$

$$R_3 = \left|\Delta L_{exp}^{f} - \Delta L_{num}^{f}\right| \quad (22)$$

$$R_4 = \left|P_{exp}^{f} - P_{num}^{f}\right| \quad (23)$$

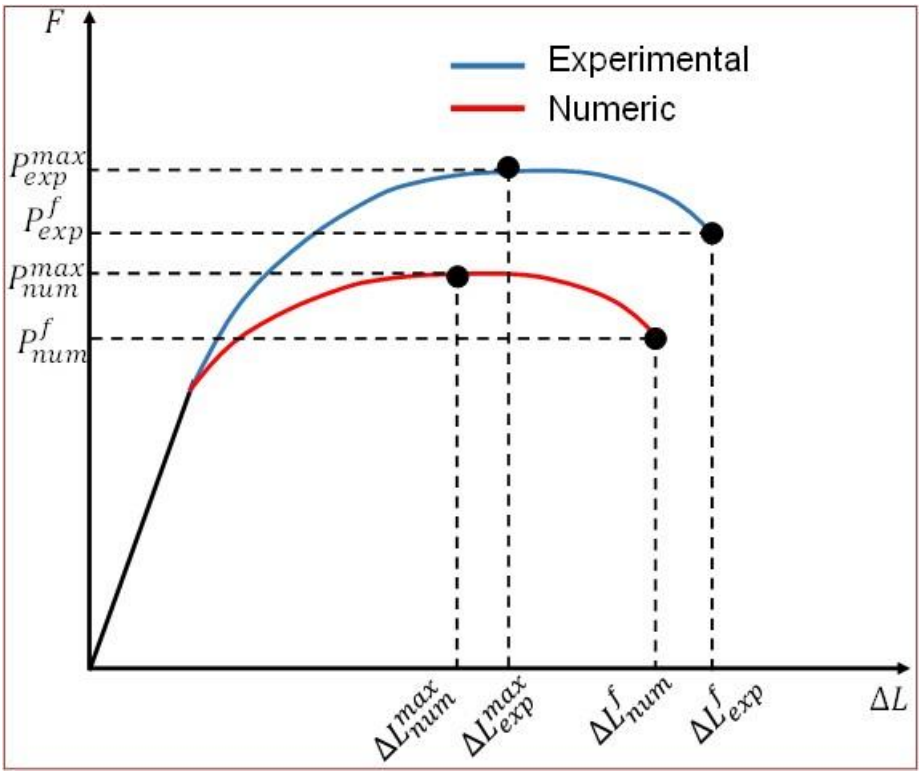
$$R_5 = \frac{\sum_{j=1}^{n} P}{\sum_{j=1}^{n} \Delta L} \quad (24)$$

onde ΔL é o valor de deslocamento obtido na curva carga *vs* deslocamento e P o respectivo valor de carga. Os subscritos exp e num denotam a curva experimental e numérica, respectivamente, enquanto os sobrescritos max e f indicam o ponto de máximo e de ruptura final obtidos nas curvas. A Figura 4 ilustra estas respostas.

Tabela 3 – Níveis das variáveis independentes e seus valores reais.

Variável independente (Parâmetros)	Nível				
	-1	**-0,5**	**0**	**+0,5**	**+1**
f_0	0,000001	0,002501	0,005001	0,0075	0,010
f_N	0,03	0,04	0,05	0,06	0,070
f_c	0,10	0,175	0,25	0,325	0,40
f_f	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80

Figura 4 – Esquema de definição das variáveis de respostas.



3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Considerando os níveis das variáveis e seus valores reais, conforme a Tabela 3, e que os valores reais não podem ser negativos, escolheu-se um planejamento experimental compósito central inscrito, tal como descrito pela Tabela 4. Este planejamento possui $2^k + 2 \cdot k$ experimentos (sendo $k = 4$ variáveis independentes), acrescido de 1 ponto central. Os valores obtidos para as variáveis dependentes (Equação (10) a (14) também são mostrados.

Uma regressão não-linear para cada variável de dependente foi feita e modelos estatísticos foram derivados, conforme abaixo. Para cada modelo, a análise de variância (ANOVA) é mostrada nas Tabelas 5 a 9. Para todas a regressões, como o valor F da regressão é muito maior que o obtido para a distribuição de Snedecor (F_{calc}), todos os modelos são ajustados e preditivos.

$$R_1 = 0{,}631747 - 0{,}011500f_0 - 0{,}036333f_N \quad (15)$$

$$R_2 = 128{,}3174 + 119{,}3667f_0 - 9{,}7000f_N \quad (16)$$

$$R_3 = 0{,}190546f_N^2 + 0{,}121106f_f + 0{,}278296f_f^2 - 0{,}143593f_0f_f - 0{,}398593f_Nf_f \quad (17)$$

$$R_4 = 1988{,}467 + 2943{,}987f_f + 755{,}085f_f^2 \quad (18)$$

$$R_5 = 784{,}994 + 495{,}008f_f \quad (19)$$

Tabela 4 – Planejamento experimental compósito central inscrito com $2^k + 2 \cdot k$ e 1 ponto central.

Exp,	f_0	f_N	f_c	f_f	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5
1	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	0,654747	63,81744	0,018874	517,817	223,0342
2	-0,5	-0,5	-0,5	+0,5	0,654747	63,81744	0,589126	4529,709	649,7361
3	-0,5	-0,5	+0,5	-0,5	0,654747	63,81744	0,001126	882,437	489,3276
4	-0,5	-0,5	+0,5	+0,5	0,654747	63,81744	0,585126	4595,207	1129,65
5	-0,5	+0,5	-0,5	-0,5	0,624747	73,51744	0,378874	1074,901	1122,545
6	-0,5	+0,5	-0,5	+0,5	0,624747	73,51744	0,150126	4106,357	1016,205
7	-0,5	+0,5	+0,5	-0,5	0,624747	73,51744	0,359874	1488,975	341,7003
8	-0,5	+0,5	+0,5	+0,5	0,624747	73,51744	0,147126	4199,211	1025,088
9	+0,5	-0,5	-0,5	-0,5	0,639747	183,2174	0,145874	737,501	482,5412
10	+0,5	-0,5	-0,5	+0,5	0,639747	183,2174	0,427126	4352,401	1094,005
11	+0,5	-0,5	+0,5	-0,5	0,639747	183,2174	0,126874	1119,663	447,0908
12	+0,5	-0,5	+0,5	+0,5	0,639747	183,2174	0,424126	4429,925	1101,159
13	+0,5	+0,5	-0,5	-0,5	0,614747	192,9174	0,679874	657,923	366,9169
14	+0,5	+0,5	-0,5	+0,5	0,614747	192,9174	0,053126	4054,213	1006,623
15	+0,5	+0,5	+0,5	-0,5	0,614747	192,9174	0,437874	1489,371	333,8694
16	+0,5	+0,5	+0,5	+0,5	0,614747	192,9174	0,050126	4156,547	1016,563
17	-1	0	0	0	0,653747	9,01744	0,160126	2478,575	852,6362
18	+1	0	0	0	0,634747	247,6174	0,081874	2082,079	791,4915
19	0	-1	0	0	0,706747	118,6174	0,455126	2815,317	952,1772
20	0	+1	0	0	0,598747	138,0174	0,293874	1607,651	684,4771
21	0	0	-1	0	0,631747	128,3174	0,023874	2188,357	799,9141
22	0	0	+1	0	0,631747	128,3174	0,008126	1855,225	771,5918
23	0	0	0	-1	0,631747	128,3174	0,255874	1163,261	406,946
24	0	0	0	+1	0,631747	128,3174	0,844126	5599,692	1260,99
25	0	0	0	0	0,631747	128,3174	0,007126	1988,467	784,9939

Tabela 5 – ANOVA obtida para a variável de resposta R_1.

Variável Independente	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Média quadrática	Valor F	Valor p
f_0 (1)	0,000794	1	0,000794	6,71083	0,026926
f_0^2	0,000046	1	0,000046	0,39007	0,546247
f_N (2)	0,007921	1	0,007921	66,98710	0,000010
f_N^2	0,000194	1	0,000194	1,64174	0,229000
f_c (3)	0,000000	1	0,000000	0,00000	1,000000
f_c^2	0,000014	1	0,000014	0,11645	0,739975
f_f (4)	0,000000	1	0,000000	0,00000	1,000000
f_f^2	0,000014	1	0,000014	0,11645	0,739975
(1) X (2)	0,000025	1	0,000025	0,21143	0,655483
(1) X (3)	0,000000	1	0,000000	0,00000	1,000000
(1) X (4)	0,000000	1	0,000000	0,00000	1,000000
(2) X (3)	0,000000	1	0,000000	0,00000	1,000000
(2) X (4)	0,000000	1	0,000000	0,00000	1,000000
(3) X (4)	0,000000	1	0,000000	0,00000	1,000000
Regressão	0,009008	2	0,004504	63,436620	-
Resíduos	0,001562	22	0,000071	1	-
Erro	0,001182	10	0,000118	1,661972	-
Soma dos quad. total	0,010570	24	-	-	-
R^2	0,88813	R^2 adj.	0,73152	F_{calc}	3,44

Tabela 6 – ANOVA obtida para a variável de resposta R_2.

Variável independente	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Média quadrática	Valor F	Valor p
f_0 (1)	85490,41	1	85490,41	32058902	0,000000
f_0^2	0,00	1	0,00	0	0,599470
f_N (2)	564,54	1	564,54	211702	0,000000
f_N^2	0,00	1	0,00	0	0,599470
f_c (3)	0,00	1	0,00	0	1,000000
f_c^2	0,00	1	0,00	0	0,599470
f_f (4)	0,00	1	0,00	0	1,000000
f_f^2	0,00	1	0,00	0	0,599470
(1) X (2)	0,00	1	0,00	0	1,000000
(1) X (3)	0,00	1	0,00	0	1,000000
(1) X (4)	0,00	1	0,00	0	1,000000
(2) X (3)	0,00	1	0,00	0	1,000000
(2) X (4)	0,00	1	0,00	0	1,000000
(3) X (4)	0,00	1	0,00	0	1,000000
Regressão	86054,95	2	43027,475	39,115886	-
Resíduos	0,02	22	1100	1	-
Erro	0,03	10	0,003	$2,73 \times 10^{-6}$	-
Soma dos quad. total	86054,97	24	-	-	-
R^2	1	R^2 adj.	1	F_{calc}	3,44

Tabela 7 – ANOVA obtida para a variável de resposta R_3.

Variável independente	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Média dos quadrados	Valor F	Valor p
f_0 (1)	0,000073	1	0,000073	0,00622	0,938677
f_0^2	0,011492	1	0,011492	0,98433	0,344532
f_N (2)	0,006136	1	0,006136	0,52561	0,485078
f_N^2	0,102516	1	0,102516	8,78113	0,014208
f_c (3)	0,004880	1	0,004880	0,41803	0,532478
f_c^2	0,000360	1	0,000360	0,03086	0,864056
f_f (4)	0,088000	1	0,088000	7,53775	0,020637
f_f^2	0,218679	1	0,218679	18,73115	0,001494
(1) X (2)	0,004072	1	0,004072	0,34880	0,567899
(1) X (3)	0,003115	1	0,003115	0,26683	0,616697
(1) X (4)	0,082476	1	0,082476	7,06458	0,023984
(2) X (3)	0,003115	1	0,003115	0,26683	0,616697
(2) X (4)	0,635507	1	0,635507	54,43493	0,000024
(3) X (4)	0,005068	1	0,005068	0,43407	0,524879
Regressão	1,165490	4	0,291372	28,20508	-
Resíduos	0,206610	20	0,010330	1	-
Erro	0,116746	10	0,011675	1,13011	-
Soma dos quad. total	1,372100	24	-	-	-
R^2	0,91491	R^2 adj.	0, 79579	F_{calc}	2,87

Tabela 8 – ANOVA obtida para a variável de resposta R_4.

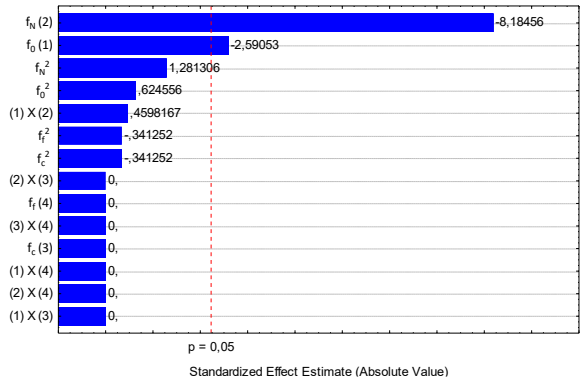
Variáveis independentes	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Média dos quadrados	Valor F	Valor p
f_0 (1)	59010	1	59010	0,2206	0,648629
f_0^2	118092	1	118092	0,4415	0,521405
f_N (2)	230593	1	230593	0,8622	0,374998
f_N^2	81685	1	81685	0,3054	0,592643
f_c (3)	115405	1	115405	0,4315	0,526083
f_c^2	15985	1	15985	0,0598	0,811807
f_f (4)	52002359	1	52002359	194,4356	0,000000
f_f^2	1609844	1	1609844	6,0192	0,034059
(1) X (2)	24470	1	24470	0,0915	0,768488
(1) X (3)	13020	1	13020	0,0487	0,829813
(1) X (4)	14264	1	14264	0,0533	0,822019
(2) X (3)	18969	1	18969	0,0709	0,795408
(2) X (4)	505758	1	505758	1,8910	0,199110
(3) X (4)	171002	1	171002	0,6394	0,442518
Regressão	1885944,94	2	942972,47	57,36254	-
Resíduos	54980455,76	2	27490227,88	174,47939	-
Erro	3466226,073	22	157555,73	1,00000	-
Soma dos quad. total	58446682	24	-	-	-
R^2	0,95424	R^2 adj.	0,89018	F_{calc}	3,44

Tabela 9 – ANOVA obtida para a variável de resposta R_5.

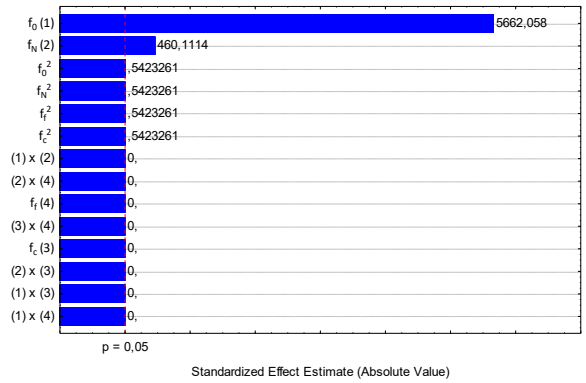
Variável independente	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Média dos quadrados	Valor F	Valor p
f_0 (1)	3056	1	3056	0,08471	0,776962
f_0^2	114	1	114	0,00315	0,956317
f_N (2)	251	1	251	0,00695	0,935207
f_N^2	191	1	191	0,00528	0,943483
f_c (3)	746	1	746	0,02068	0,888511
f_c^2	1695	1	1695	0,04700	0,832732
f_f (4)	1470196	1	1470196	40,75633	0,000080
f_f^2	0	1	0	0,00001	0,997273
(1) X (2)	125071	1	125071	3,46718	0,092206
(1) X (3)	41	1	41	0,00114	0,973732
(1) X (4)	55680	1	55680	1,54353	0,242438
(2) X (3)	143070	1	143070	3,96613	0,074433
(2) X (4)	11724	1	11724	0,32501	0,581195
(3) X (4)	74112	1	74112	2,05450	0,182273
Regressão	1885944,94	1	1885944,94	119,93985	-
Resíduos	361654,058	23	15724,089	1	-
Erro	360728	10	36073	-	-
Soma dos quad. total	2247599	24	-	-	-
R^2	0,83951	R^2 adj.	0,61481	F_{calc}	4,28

Os gráficos de Pareto para cada variável de resposta são mostrados na Figura 5, onde os valores dos coeficientes estatisticamente significantes de cada variável independente e suas combinações foi aferido pelo valor-p: coeficientes com valor-p inferiores a 0,05, ou seja, a direita da linha tracejada vermelha, são estatisticamente significativos e compõem os modelos estatísticos.

Figura 5 – Gráfico de Pareto e Superfície de resposta para as varáveis de resposta: (a) R_1; (b) R_2; (c) R_3; (d) R_4; (e) R_5.

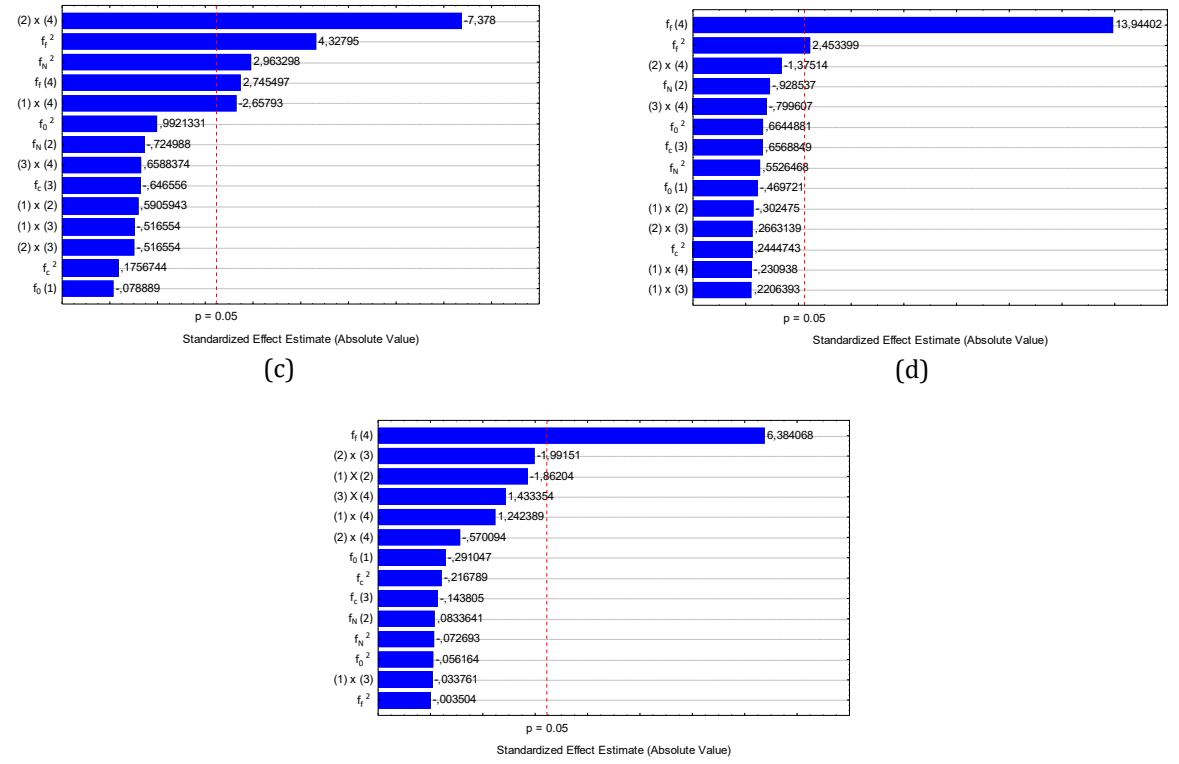


(a)



(b)

Figura 5 – Gráfico de Pareto e Superfície de resposta para as varáveis de resposta: (a) R_1; (b) R_2; (c) R_3; (d) R_4; (e) R_5.(continuação)



As superfícies de resposta obtidas pelos modelos são mostradas na Figura 6. Através da otimização destas superfícies de resposta, na qual buscou-se os valores das variáveis independentes que tornassem as Equações (10) a (14) igual a zero, e com alguns ajustes, determinou-se os parâmetros declarados na Tabela 10. O resultado são mostrados na Figura 6, onde um excelente ajuste entre a curva experimental e a curva prevista numericamente pode ser observada.

Figura 5 – Superfície de resposta para as varáveis de resposta: (a) R_1; (b) R_2; (c) R_3; (d) R_4; (e) R_5.

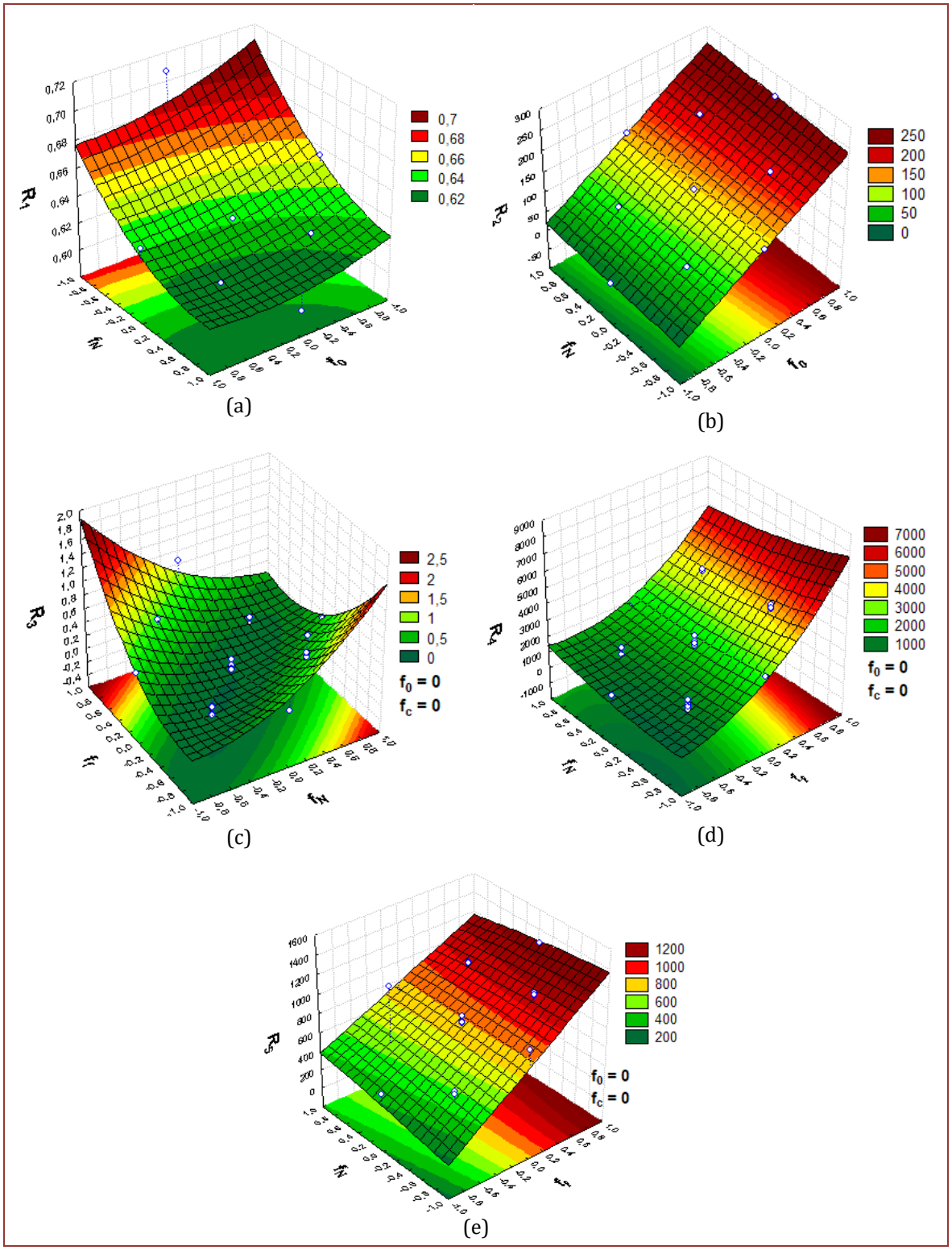


Tabela 5 – Níveis das variáveis independentes e seus valores reais.

Parâmetro	Valor
f_0	10^{-4}
f_N	0,05
f_c	0,40
f_f	0,47

Figura 6 – Curvas experimental e numérica (GTN).

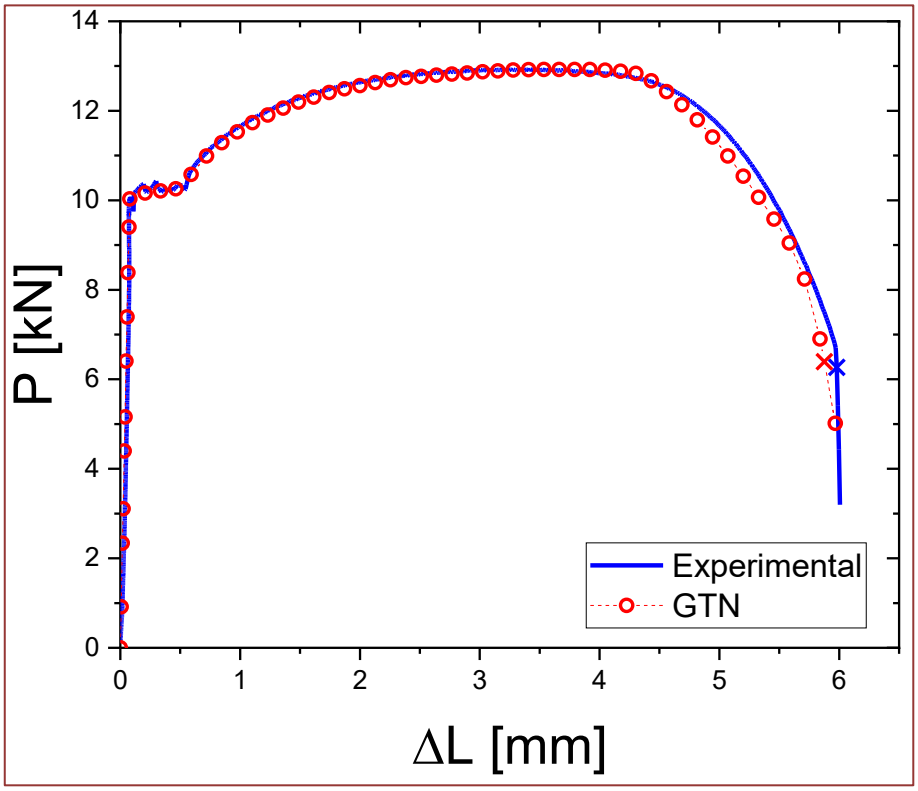


Tabela 6 – Valores observados e previstos pelas curvas experimental e numérica (GTN).

Propriedade	Experimental	GTN	Unidade
Limite de escoamento	357	357,41	MPa
Limite de resistência	457	457,10	MPa
Tensão de ruptura	221	226,11	MPa
Deformação de ruptura	0,16611	0,16322	mm/mm

4. CONCLUSÕES

O uso de planejamento experimental para auxiliar na calibração dos parâmetros do modelo de dano GTN foi avaliado:

- As variáveis de resposta (dependentes) foram definidas em pontos específicos ao longo da curva de tração carga-deslocamento;
- A influência das variáveis independentes foi determinada;
- Menos ajustes foram feitos para determinar um conjunto de parâmetros que gerou um excelente ajuste entre os resultados experimentais e numéricos.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao Núcleo Avançado em Fratura, Fadiga e Integridade Estrutural (NAFFIE/UFCG) e Laboratório de Modelagem e Simulação (LMS) da Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Campina Grande (UAEM/UFCG) pela infraestrutura utilizada.

REFERÊNCIAS

[1] CHU, C. C.; NEEDLEMAN, A. Void nucleation effects in biaxially stretched sheets. Journal of Engineering Materials and Technology, v. 102, n. 3, p. 249–256, 1980.

[2] FRANÇOIS, D.; PINEAU, A.; ZAOUI, A. Mechanical Behaviour of Materials: Fracture Mechanics and Damage. 2. ed. Dordrecht: Springer, 2013. v. 2

[3] GURSON, A. L. Continuum theory of ductile rupture by void nucleation and growth: Part I - Yield criteria and flow rules for porous ductile media. Journal of Engineering Materials and Technology, v. 99, n. 1, p. 2–15, 1977.

[4] KACHANOV, L. M. Introduction to Continuum Damage Mechanics. 1. ed. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1986.

[5] PINEAU, A.; PARDOEN, T. Failure of metals. Em: MILNE, I.; RITCHIE, R. O.; KARIHALOO, B. (Eds.). Comprehensive structural integrity. Oxford: Pergamon, 2007. v. 2p. 684–797.

[6] QIAN, C.; ZHOU, W. Investigation of ductile crack growth and normalization method for SE (T) specimen using finite element analyses. Ontario: [s.n.].

[7] TVERGAARD, V. Influence of voids on shear band instabilities under plane strain conditions. International Journal of Fracture, v. 17, n. 4, p. 389–407, 1981.

[8] TVERGAARD, V.; NEEDLEMAN, A. Analysis of the cup-cone fracture in a round tensile bar. Acta Metallurgica, v. 32, n. 1, p. 157–169, 1984.

Capítulo 8

Compósitos poliméricos reforçados com fibras: uma curta revisão

Sebastião da Silva Pinto[1]
Antonio Gilson Barbosa de Lima[2]
Laura Hecker de Carvalho[3]

Resumo: Compósitos reforçados com fibras apresentam vários benefícios devido sua facilidade de processamento e resistência à cargas elevadas. Os compósitos híbridos têm sido aplicados em muitos setores da atividade humana que vão desde a produção de bens de consumo até fabricação próteses ortopédicas. Este trabalho tem como foco as propriedades de tração, flexão e impacto de compósitos híbridos de poliéster insaturado reforçados com fibras de juta e fibras de vidro. A ideia é auxiliar pesquisadores, engenheiros e industriais neste tema de conhecimento.

Palavras–chave: propriedades mecânicas; compósitos poliméricos; hibridização; fibras vegetais; fibras de vidro; juta

[1] Estudante do Curso de Pós-Graduação em Ciências e Engenharia de Materiais - UAEMA - UFCG
[2] Docente/pesquisador do Depto de Engenharia Mecânica – UAEM – UFCG
[3] Docente/pesquisador do Depto de Engenharia de Materiais – UAEMa – UFCG

1. COMPÓSITOS: FUNDAMENTOS

Um material é considerado compósito quando ele é obtido através da combinação de dois ou mais materiais diferentes, podendo ter propriedades (mecânicas, por exemplo) superiores as dos materiais de forma isolada. Na sua constituição tem-se uma matriz e reforço, onde a matriz dá forma ao compósito e tem como função proteger o reforço. Já o reforço define as propriedades mecânicas e a estrutura interna do compósito. A região que separa a matriz e o reforço é denominada de interface.

A classificação dos materiais compósitos segue a natureza físico-química da matriz, e são divididos em três categorias: cerâmicos, metálicos e poliméricos. Os cerâmicos são inorgânicos, com alta resistência térmica e alta fragilidade. Os metálicos são dúcteis, mas enfrentam restrições devido à sua elevada densidade e custo. Os poliméricos têm baixa densidade, conformação simples e alta resistividade elétrica.

As aplicações dos materiais compósitos são diversas, variando desde os esportes, nas indústrias de transporte, elétricas e até na medicina.

1.1. MATRIZES POLIMÉRICAS.

Os polímeros são moléculas de cadeia muito longa com uma estrutura constituída por átomos de carbono unidos por ligação covalente. Os materiais poliméricos podem ser naturais (orgânicos, baseados em carbono, ou inorgânicos) ou sintéticos, tendo estes materiais baixas densidades.

As matrizes poliméricas estão divididas em dois grupos principais: termofixas (ou termorrígidas) e termoplásticas.

Os termofixos são polímeros que têm uma estrutura de rede tridimensional. Uma vez curados, estes materiais tornam-se sólidos e não há a possibilidade de derrete-los ou lhes dar outra forma. Os polímeros termofixos possuem boa resistência, rigidez e dureza. Têm ductilidade, baixas propriedades de impacto e uma T_g relativamente elevada. Seu comportamento mecânico é frágil quando submetido a teste de tração. Entre os pontos negativos deste tipo de material pode-se destacar a dificuldade em recicla-los. Nesta categoria de material estão o poliéster insaturado, os epóxis, o poliuretano e a resina fenólica, por exemplos.

Os polímeros termoplásticos são polímeros lineares com alto peso molecular que, ao serem aquecidos em temperaturas abaixo da temperatura de decomposição, não sofrem alterações químicas de forma permanente. São relativamente moles e dúcteis. Sob aquecimento derretem e amolecem, o que permite o seu processamento em altas temperaturas. Ao contrário dos termofixos que são polímeros amorfos, os termoplásticos podem ter algum grau de cristalinidade (dependendo se o polímero permite ou não o alinhamento das cadeias poliméricas, da temperatura e da taxa de resfriamento). E, em baixas temperaturas, estes materiais se tornam um sólido que pode ser parcialmente cristalino e parcialmente amorfos. São recicláveis, o que permite o prolongamento de seu uso na cadeia produtiva e de consumo. O polietileno, o poliestireno, o polimetilmetacrilato, e o teflon são exemplos de matrizes termoplásticas.

As resinas de poliéster insaturado são amplamente empregadas em compósitos de uso geral, devido ao seu baixo custo e à excelente resistência à corrosão que oferecem, além das vantagens em relação a outras resinas termofixas, incluindo cura à temperatura ambiente, boas propriedades mecânicas e transparência. A cura da resina de poliéster

insaturado é iniciada com a adição de um catalisador, que se decompõe em radicais livres para reagir com o estireno, usado como solvente, e este novo radical livre ataca as ligações duplas do poliéster insaturado e, assim, unindo cadeias através de pontes de poliestireno. Os principais tipos de resina de poliéster insaturado são as tereftálicas, as isoftálicas e as ortoftálicas.

1.2. REFORÇOS.

A função do reforço em um compósito é melhorar as propriedades do material. O tipo de reforço a ser utilizado em um material compósito dependerá das propriedades que se almeja obter, podendo ser fibras vegetais como sintéticas como sisal, juta, bagaço de cana, carbono e vidro, por exemplo, ou, cargas minerais como argila, caulim, talco e feldspato.

A classificação dos reforços pode ser realizada de acordo com sua natureza ou geometria (Melo, 2017; Melo, 2014), como segue:

a) Geometria:

- Particulados, aproximando-se de uma forma esferoidal.
- Fibrosos, apresentando boa relação entre comprimento e diâmetro.
- Laminados, na forma de mantas ou placas muito finas.

b) Natureza:

- Rígidos, para aumentar o módulo de elasticidade do material.
- Flexíveis, para promover o aumento da resistência ao impacto.
- Resistentes à temperatura, para aumentar a estabilidade térmica.
- Duro, para aumentar a dureza e a resistência à abrasão.
- Resistente à ruptura, para promover elevada resistência a tração, cisalhamento e flexão.

Os reforços podem apresentar diversas formas como (Moura *et al.*, 2010):

- Roving: cordão de filamentos contínuos enrolados em bobinas, sendo constituídos por fibras com diâmetros que variam de 9 a 13µm.
- Tecidos 2D: que são confeccionados com uma ligação entre feixes de fibras longas ou uma combinação de fibras, sendo geralmente utilizados em aplicações que exigem propriedades mecânicas elevadas. A diferença de um tecido 3D para um tecido 2D é que os do tipo 3D têm fibras orientadas na direção da espessura. Nesta categoria de tecido tem-se os que são do tipo entrelaçados e que são produzidos através do entrelaçamento das fibras nas direções perpendiculares; o quase direcionais, que são caracterizados pelas fibras geralmente estarem a 0°; e, os tecidos híbridos, resultado da combinação de fibras diferentes.
- Tecidos 3D: obtidos por processos especiais de tecelagem que ligam múltiplas camadas de fibras com orientações diversas.
- Malhas: que são obtidas pela ligação sucessiva de camadas de fibras alinhadas.

- Entrançados: são disponibilizados em forma plana e tubular. Apesar de serem mais caros que as mantas, têm uma resistência especifica mais elevada.
- Pré-formas: produzidas em formas 2D ou 3D, com fibras curtas ou contínuas. As pré-formas de fibras curtas são obtidas através do corte e sobreposição manual de mantas ou da projeção das fibras. Já as pré-formas de fibras contínuas são resultado da união de camadas bidimensionais de tecidos com orientações variadas.

A fibra de juta é uma das principais fibras vegetais empregadas como reforço em compósitos, devido à sua combinação de baixo custo e boas propriedades mecânicas. Há dois tipos desta fibra vegetal, a juta branca (Corchorus capsularis) e a juta rosa (Corchorus olitorius). A sua composição química tem principalmente celulose, hemicelulose, lignina, pectina, cera e água. As propriedades mecânicas da fibra de juta são mostradas na Tabela 1.

Tabela 19.Parâmetros físico, geométrico e mecânico da fibra de juta.

Propriedade (Unidade)	Valor
Diâmetro (μm)	25-200
Elongação (%)	1,16 – 1,5
Densidade (g/cm^3)	1,46
Ângulo micro-fibrilar (°)	8,0 – 8,1
Comprimento da fibra (mm)	0,8 - 6
Resistência à tração (MPa)	393-773
Módulo de Young (GPa)	13-26,5

Fonte: Gupta et al, (2021); Chand et al, (2021).

A fibra de juta tem muitas vantagens como, por exemplo, é biodegradável e reciclável, tem boa resistência à tração, é livre de odor ou substância narcótica além de ter boas propriedades isolantes e estáticas, e baixa condutividade térmica. Suas desvantagens residem no fato dela ser frágil, absorver umidade, apresentar desprendimento de fibras e ser resistente à dobra.

As fibras de vidro são fabricadas pela mistura fundida de areia de sílica, calcário, dolomita, parafina, ácido bórico e outros componentes a uma temperatura acima de 1200°C (Feng *et al.*, 2017; Rajak *et al.*, 2022). As fibras de vidro são muito finas, leves, com alta resistência e muito duráveis. As principais aplicações deste material estão concentradas na construção de aeronaves, na construção civil, em produtos resistentes à corrosão, nas indústrias eletroeletrônica, naval e automotiva, dentre muitas outras áreas.

Os principais tipos de fibra de vidro são; a fibra de vidro-A (com óxidos de metais alcalinos), fibra de vidro-C (resistente à ataques químicos), fibra de vidro-D (altamente dielétrica), fibra de vidro-E (com alto isolamento elétrico), fibra de vidro-M (possuindo alto módulo de Young), fibra de vidro-S (elevada resistência à tração) e a fibra de vidro-AR (resistente aos alcalinos). Após processadas, essas fibras podem ter a forma de fios, tecidos ou tapetes. A Tabela 2 resume as composições dos diferentes tipos de fibra de vidro.

Tabela 20. Composição química dos diferentes tipos de fibra de vidro.

Fibra de vidro	Composição (%)						
	SiO_3	Al_2O_3	B_2O_3	CaO	Na_2O	MgO	Outros
A	72	0,6-1,5	-	10	14,2	2,5	0,7% de SO_3
C	65	4	6	14	8	3	
D	74	0,3	22	0,5	1,0	-	0,5% de LiO_3
E	53-56	12-16	5-13	16-25	0-2	0,6	0-1,5% de TiO_3
M	53,7	-	-	12,9	-	9,0	2,0% de ZrO_2, 8,0% de BeO_2,8% de TiO_2, 3% de CeO_2
AR	71	-	-	-	11	-	16% ZrO_2, 2,0% de TiO_2

Fonte: Feng et al.,(2017).

Se por um lado as fibras isoladas têm sido frequentemente usada como reforço, por outro, o reforço híbrido também tem sua importância. A hibridização é realizada com a combinação de dois ou mais reforços na mesma matriz polimérica, cujo resultado é um compósito híbrido com propriedades mecânicas intermediárias as dos materiais utilizados como referência. Estes materiais podem ter como reforços duas ou mais fibras vegetais (por exemplo, juta e sisal), duas ou mais fibras sintéticas (fibras de vidro e carbono), ou serem constituídos de fibras vegetais e sintéticas (fibras de juta e vidro).

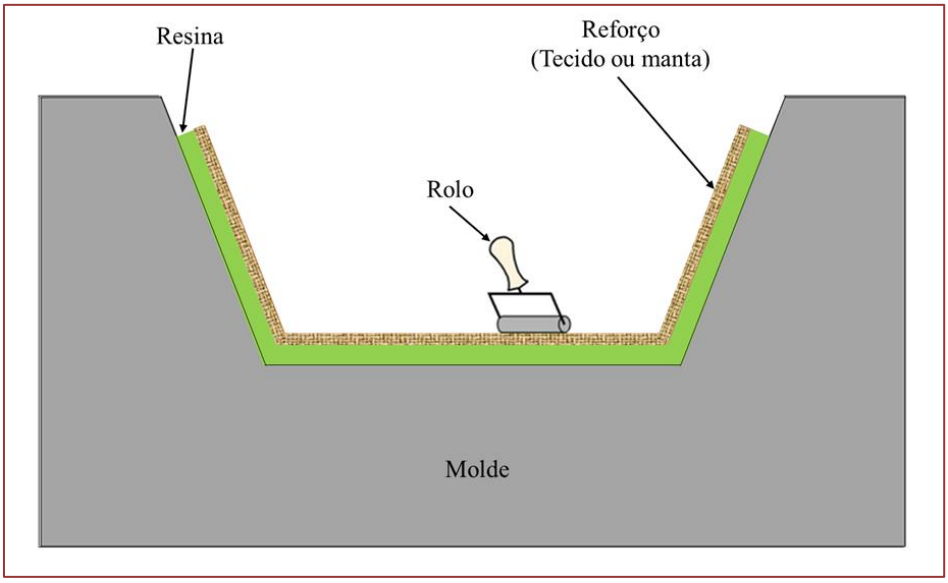
2. MÉTODOS DE PROCESSAMENTO DE COMPÓSITOS

O processamento abrange uma grande variedade de técnicas que permite obter materiais compósitos. Os métodos de processamento podem ser classificados como em molde aberto ou em molde fechado. No primeiro caso, apenas uma das superfícies do compósito tem um bom acabamento, já, o processamento em molde aberto garante maior liberdade para a confecção de materiais com geometria complexa e componentes com grandes dimensões. Os materiais produzidos em molde fechado têm melhor acabamento nas duas superfícies em relação aos confeccionados em molde aberto, e menor emissão de estireno, o que ocorre nos processamentos que utilizam molde aberto. A seguir descreve-se alguns métodos de processamento de materiais compósitos.

2.1. LAMINAÇÃO MANUAL.

O processo de laminação manual é uma técnica simples que geralmente requer cura em temperatura ambiente com baixa pressão e que tem um baixo investimento para fabricação de materiais. Neste processo, as camadas de reforço são empilhadas e impregnadas de forma manual em molde aberto. Antes da aplicação da resina é aplicado um agente desmoldante no molde para facilitar a desmoldagem do material após a cura. Após a aplicação do desmoldante, uma camada de resina é aplicada no molde para garantir um melhor acabamento superficial do material. Então uma camada de reforço é colocada no molde e impregnada com resina. Para que a resina seja uniformemente distribuída na superfície é utilizado um rolo (ou rolete), o qual deve ser deslizado em direções perpendiculares para retirar o ar aprisionado dentro do material e o excesso de resina. Comumente a desmoldagem do material é realizada em um dia. A laminação manual é muito utilizada na fabricação de barcos, pás de moinhos de vento, tanques de armazenamento, piscinas e peças de protótipos (Mazumdar, 2002). Um esquema da técnica de laminação manual é ilustrada na Figura 1.

Figura 1 – Representação Esquemática da laminação manual.



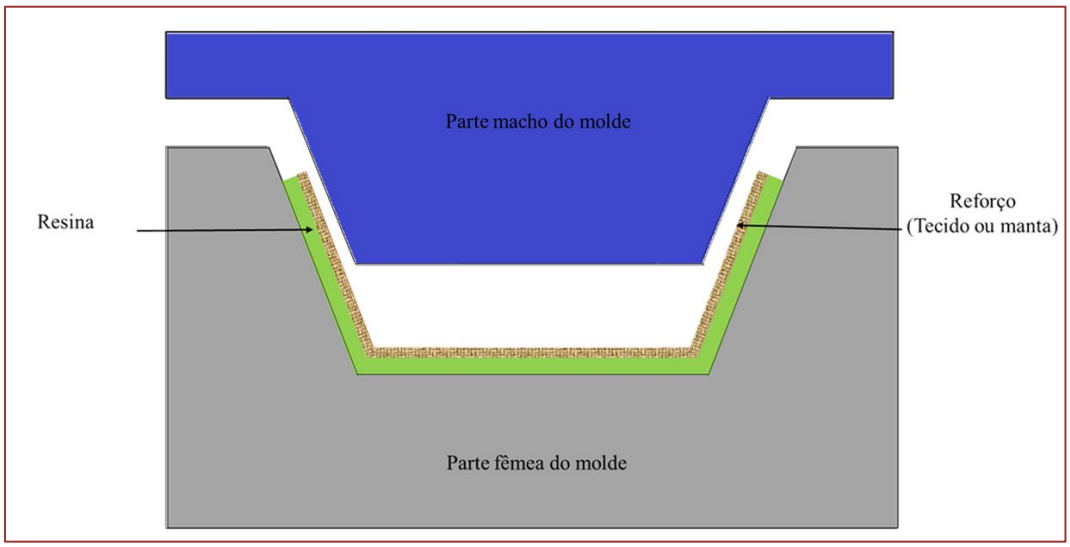
Entre as vantagens da laminação manual, além do baixo custo, inclui-se sua simplicidade e baixa restrição à geometria do material a ser produzido. No entanto, suas maiores desvantagens estão na qualidade do produto produzido, já que esta depende da habilidade de quem faz o material; acabamento superficial de boa qualidade apenas em um lado do material; e liberação de estireno, já que é utilizado um molde aberto. Deste modo, para utilização deste método de processamento é necessário que ele seja realizado em um local com boa circulação de ar (Moura *et al.*, 2010), além do uso de EPIs como: máscaras, luvas e óculos de proteção.

2.2. MOLDAGEM POR COMPRESSÃO.

Na moldagem por compressão (Figura 2) se faz uso de um molde com matrizes macho e fêmea que se fecham para formar uma cavidade no formato correspondente (Baker *et al.*, 2004). O molde para moldagem por compressão geralmente é feito de aço e niquelado ou cromado para melhorar o acabamento da superfície do material e a resistência ao desgaste do molde (Mazumdar, 2002).

As camadas de reforço e matriz são empilhadas e impregnadas utilizando a laminação manual. Após a laminação, o molde é fechado e todo o conjunto é submetido a uma determinada pressão para retirar o excesso de resina e ar dentro do material, sendo este tipo de processamento uma variação da laminação manual (Aranha, 2019). O processo de cura pode ser realizado em temperatura ambiente ou por aquecimento. Esta técnica é muito utilizada nas indústrias automotiva, marítima e espacial na fabricação de painéis estruturais, assim como na produção de bens de consumo gerais.

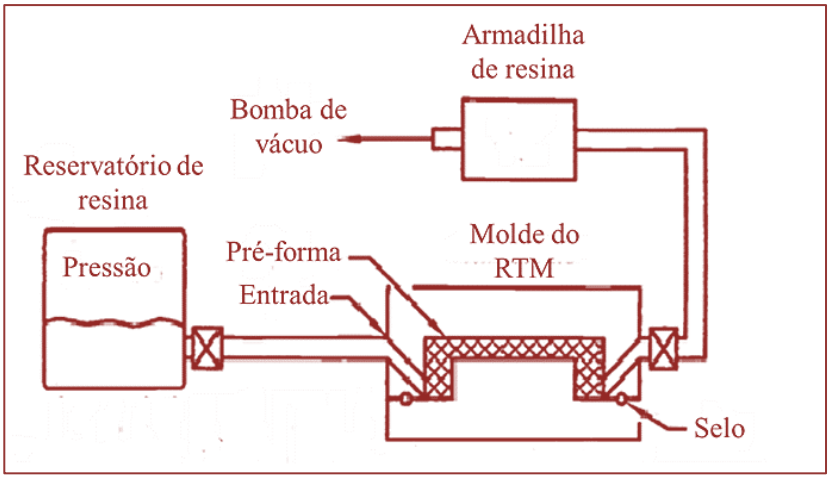
Figura 2. Representação esquemática de um para moldagem por compressão.



As vantagens e desvantagens são quase similares aos da laminação manual, no entanto, na moldagem por compressão, o acabamento das peças produzidas são melhores que às das obtidas por meio da laminação manual. E, com relação ao custo de operação, ela é mais cara que a laminação manual devido a usinagem no molde utilizado.

Moldagem por Transferência de Resina (RTM). Neste método de processamento, a pré-forma fibrosa seca de reforço é posicionada em um molde aberto com pontos de entrada de resina e saída de ar. Em seguida este molde é fechado. Em sequência, uma resina líquida pré-catalisada é transferida ou injetada no molde, para preencher todos os espaços vazios e impregnando as fibras. Após o total preenchimento do molde, espera-se a cura da resina. Geralmente, aplica-se vácuo na porta de saída para retirar o ar e qualquer umidade que possa ter no molde/pré-forma antes da injeção. A Figura 3 esquematiza o processo de RTM.

Figura 3. Representação esquemática da RTM.



Adaptado de Baker *et al.*, (2004).

As vantagens do método RTM incluem excelente controle dimensional, bom acabamento, peças com boas propriedades mecânicas, custo reduzido de material e operação quando comparada a moldagem por compressão, processamento de peça complexas, automatização do processo, permite o uso de uma grande variedade de reforços, e frações volumétricas de fibras mais elevadas (até 65%, podem ser alcançadas). Entre as limitações do método RTM tem-se maior custo com ferramentas e equipamentos quando comparado com o processo de laminação manual, por exemplo.

2.3. MOLDAGEM POR TRANSFERÊNCIA DE RESINA ASSISTIDA A VÁCUO (VARTM).

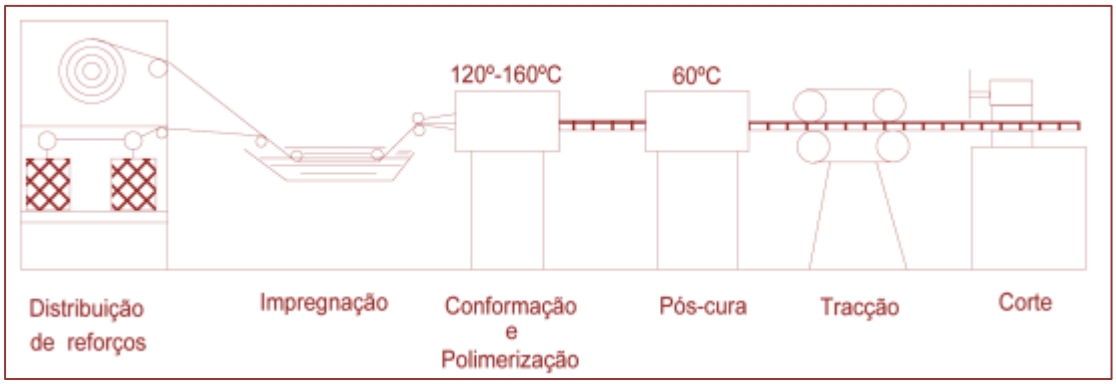
A técnica VARTM é uma adaptação da RTM. Neste processo, as fibras são colocadas em um molde unilateral e uma abertura é feita sobre o topo para formar a vedação a vácuo. Um procedimento de vácuo é utilizado para puxar a resina para dentro da estrutura.

2.3.1. PULTRUSÃO.

É um método de processamento automatizado no qual as fibras são puxadas e imersas em um recipiente contendo resina líquida. Após serem impregnadas com a resina, as fibras são direcionadas para um molde metálico aquecido. Por fim, a resina é curada através do aquecimento do molde.

As vantagens desta é técnica inclui-se processo contínuo e automatizado, no qual é possível produzir um grande volume de compósitos, além de utilizar fibras e resinas de baixo custo, o que permite a fabricação de produtos mais baratos. As suas limitações residem no fato de que através dela a produção de partes finas ou estruturas mais complexas não são possíveis de serem produzidas. A Figura 4 ilustra o processamento de compósitos através da pultrusão.

Figura 4. Representação do processo de pultrusão.



Fonte: Moura *et al.*, (2010).

3. PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS COMPÓSITTOS REFORÇADOS POR FIBRAS

As propriedades mecânicas estão relacionadas com o comportamento dos materiais quando estes são submetidos a cargas e forças, e são determinadas por testes sob condições apropriadas. Alguns testes utilizados para a determinação das propriedades mecânicas de materiais são os testes de tração, flexão, impacto e

cisalhamento, por exemplos. A seguir são mostrados alguns resultados da literatura sobre as propriedades mecânicas dos compósitos híbridos de poliéster insaturado reforçados com fibras de juta e fibras de vidro.

3.1. TRAÇÃO.

Os testes de tração geralmente são realizados seguindo a norma ASTM D3039 (Dias *et al.*, 2022) e ASTM D638-03 (DAS *et al.,* 2021). Recentes trabalhos têm analisado a resistência à tração de compósitos híbridos de poliéster insaturado reforçados com fibras de juta e fibras de vidro e os resultados têm provado como a hibridização provoca efeitos positivos na resistência a tração, assim como nas outras propriedades mecânicas dos compósitos. Kennedy *et al.* (2022) investigaram os efeitos da hibridização nas propriedades mecânicas de compósitos poliméricos híbridos reforçados com fibras de juta e fibras de vidro. Seus resultados mostram que a incorporação das fibras vidro melhoram as a resistência à tração do compósito híbrido. Ouarhim *et al.* (2020) compararam as propriedades mecânicas e a absorção de umidade de compósitos híbridos com duas configurações diferentes: inter-layer (camada por camada) e intra-layer (trama por trama). Seus resultados mostraram que o compósito híbrido na configuração intra-layer com uma camada alternada de fibras de juta e de vidro apresentam um valor de resistência à tração intermediário entre os compósitos reforçados apenas com fibras de juta ou de vidro isoladamente. De mesmo modo a resistência à flexão de outro compósito na configuração intra-layer foi maior que o compósito na configuração inter-layer. Com relação à absorção de umidade, os resultados mostraram que a hibridização teve efeito positivo na resistência a umidade. A Tabela 3 resume os resultados dos testes de tração de alguns compósitos. As camadas de fibras de juta estão representadas pela letra J e as de vidro pela letra V.

Tabela 21. Resistência e módulo de tração de compósitos híbridos juta/vidro em diferentes combinações.

Compósito	Teor de fibras (%)		Resistência à tração (MPa)	Módulo de Tração (GPa)	Método de Processamento	Referência
	Juta	Vidro				
JV	29,3	30,1	91,3	4,89	Laminação manual	Das *et al.*, (2021)
JVJ	27,4	12,3	76,7	2,58		
VJV	23,6	47,7	123,1	4,30		
JVJV	37,6	29,2	132,8	5,42		
JVJVJ	40,3	24,9	125,8	3,68		
VJVJV	24,5	30,8	137,6	4,62		
VJVJ-C	26,10	15,23	78,69	2,22	Compressão	Aranha *et al.*, (2024)
VJJV-C	26,11	15,23	61,39	1,73		
JVVJ-C	26,19	15,28	70,72	2,14		
VJJV-R	30,46	17,77	70,72	2,21	VARTM	
JVVJ-R	31,12	18,15	71,09	1,75		

*Na Tabela 3 o termo C após a combinação refere-se a moldagem por compressão e R à técnica VARTM

A exposição dos compósitos híbridos à umidade e temperaturas elevadas acarretam na diminuição na resistência e no módulo de tração destes materiais (Aranha, *et al.*, 2024). No entanto, a propriedade de tração, assim como a de flexão pode ser

melhorada com a exposição das fibras À radiação gama (Das *et al.,* 2021) e preenchimento com nanoargila (Praveena *et al.,* 2022).

3.2. FLEXÃO.

Os testes de flexão são realizados de acordo com as normas ISSO 14125 (DAS *et al.*, 2021), a ASTM D790 (Oleiwi *et al., 2022*; Praveena *et al.,* 2022). A Tabela 4 resume os valores da resistência e módulos de flexão de compósitos híbrido de poliéster insaturado reforçado com fibras de juta e fibras de vidro.

Tabela 22. Resistência e módulo de flexão de compósitos híbridos juta/vidro

Compósito	Teor de fibras (%)		Resistência a flexão (MPa)	Módulo de flexão (GPa)	Método de Processamento	Referência
	Juta	Vidro				
JV	29,3	30,1	166,6	5,54	Laminação manual	Das *et al.*, (2021)
JVJ	27,4	12,3	114,4	2,99		
VJV	23,6	47,7	313,0	9,14		
JVJV	37,6	29,2	173,6	6,71		
JVJVJ	40,3	24,9	163,3	4,41		
VJVJV	24,5	30,8	252,4	10,59		
JJJVV*	-	-	137	2,67	Laminação + exposição a vácuo	Oleiwi *et al.,* (2022)
JJJJVVVV*	-	-	191	3,03		

*Compósitos reforçados com meias de perlon nas extremidades

3.3. IMPACTO.

Os testes de impacto são realizados de acordo com as normas ASTM D6110-97 (Das, *et al.*, 2021), ASTM D7136 (Pandian *et al.,* 2022), ISO-180 (Oleiwi *et al.,* 2022), dentre outras normas disponíveis para executar estes testes. Na Tabela 5 tem-se os valores da resistência ao impacto de alguns compósitos híbridos.

Tabela 23. Propriedade de impacto de compósitos híbridos juta/vidro em diferentes combinações

Compósito	Teor de fibras (%)		Resistência ao impacto (kJ/m²)	Energia de impacto (J)	Método de Processamento	Referência
	Juta	Vidro				
JV	29,3	30,1	17,4	0,17	Laminação manual	Das *et al.*, (2021)
JVJ	27,4	12,3	25,0	0,48		
VJV	23,6	47,7	39,0	0,56		
JVJV	37,6	29,2	29,1	0,37		
JVJVJ	40,3	24,9	34,7	0,68		
VJVJV	24,5	30,8	43,7	0,78		
JJJVV*	-	-	62	-	Laminação + exposição a vácuo	Oleiwi *et al.,* (2022)
JJJJVVVV*	-	-	73	-		

*Compósitos reforçados com meias de perlon nas extremidades

A partir dos dados reportados nas Tabelas 3, 4 e 5, observamos que o aumento no teor de fibras de vidro elevou considerável as propriedades abordadas neste estudo de

revisão. O aumento das propriedades de resistência também pode ser notado nos compósitos híbridos nos quais as fibras de vidro estão colocadas nas extremidades dos compósitos.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresenta uma breve revisão sobre compósitos poliméricos reforçados por fibras, que incluem os fundamentos, métodos de processamento e propriedades mecânicas.

Dos resultados apresentados verificam-se que as propriedades de tração, flexão e impacto são muito úteis para avaliar o desempenho dos compósitos híbridos nas diversas aplicações de cotidiano. Estas propriedades podem ser melhoradas nos compósitos híbridos com aumento do teor de fibras de vidro, assim como colocando as fibras nas extremidades dos compósitos. Espera-se com essa revisão, oferecer uma base inicial para pesquisadores, engenheiros e industriais na área de compósitos poliméricos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES e CNPq pelo financiamento deste trabalho e as Unidades Acadêmicas de Engenharia Mecânica e de Engenharia de Materiais da UFCG.

REFERÊNCIAS

[1] ARANHA, R.; ALBUQUERQUE FILHO, M. A.; ANDRADE, T. H. F.; SANTOS, C. L.; FONSECA, V. M.; RIVERA, J. L. V.; LIMA, A. G. B.; AMORIM JR, W. F.; CARVALHO, L. H. Effect of Water Absorption and Stacking Sequences on the Tensile Properties and Damage Mechanisms of Hybrid Polyester/Glass/Jute Composites. Polymers, v. 16, n. 7, p. 1 -19, 2024.

[2] BAKER, A.; DUTTON, S.; KELLY, D. Composite material for aircraft structures. Reston: American Institute of Aeronautics and Astronautic, Inc, 2004. 597p.

[3] CHAND, N.; FAHIM, M. Tribology of natural fiber polymer composites. Cambridge: Elsevier, 2021. 226p.

[4] DAS, S. C.; PAUL, D.; GRAMMATIKOS, S. A.; SIDDIQUE, M. A. B.; PAPATZANI, S.; KORALLI, P.; ISLAM, J. M. M.; KHAN, M. A.; SHAUDDIN, S. M.; KHAN, R. A. Effect of stacking sequence on the performance of hybrid natural/synthetic fiber reinforced polymer composite laminates. Composite Structures, v. 276, n.1, p. 1 - 8, 2021

[5] DIAS, T. C.; SILVA, A. A. X.; TONATTO, M. L. P.; AMICO, S. C. Experimental Investigation on the Mechanical and Physical Properties of Glass/Jute Hybrid Laminates. Polymers, v. 14, n. 21, p. 1 - 15, 2022.

[6] FENG, C.; CHU, Z. Fiber Reinforcement. *In*:Yi, X.; Du, S.; Zhang, L.(org.) Composite Materials Engineering. Vol.1.Pequim: Springer, 2017. p. 63 - 69.

[7] GUPTA, M. K.; RAMESH, M.; THOMAS, S. Effect of hybridization on properties of natural and synthetic fiber-reinforced polymer composites (2001–2020): A review. Polymer Composites, v. 42, n. 10, p. 4981–5010, 2021.

[8] KENNEDY, Z. E.; RAJA M, A. I. Influence of stacking sequence and hybridization on the mechanical and tribological properties of glass and jute fiber composites. Materials Today: Proceedings. v. 55, p. 220-225, 2022.

[9] MAZUMDAR, S. K. Composites manufacturing: materials, product, and process engineering. Florida: CRC Press, 2002. 396p.

[10] MELO, R. Q. C; LIMA, A. G. B. Vegetable Fiber-Reinforced Polymer Composites: Fundamentals, Mechanical Properties and Applications. Diffusion Foundations, v.14, p. 1-20, 2017.

[11] MELO, J. B. C. A. Absorção de água em compósitos poliméricos reforçados por fibras da folha do abacaxi: modelagem e simulação. 2014. 131f. Tese de Doutorado em Engenharia de Processos. Programa de Pós-graduação em Engenharia de Processos, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande-Paraíba.

[12] MOURA, M.; F. S. F.; MORAIS, A. B.; MAGALHÃES, A. G. Materiais Compósitos - Materiais, Fabrico e Comportamento Mecânico. Porto: Publindústria, 2010. 382p.

[13] OLEIWI, J. K.; HAMAD, Q. A.; ABDULRAHMAN, S. A. Flexural, impact and max. shear stress properties of fibers composite for prosthetic socket. . Materials Today: Proceedings. v.56, p. 3121-3128, 2022.

[14] OUARHIM, W. ESSABIR, H. BENSALAH, M.; RODRIGUE, D.; BOUHFID, R.; QAISS, A. Hybrid composites and intra-ply hybrid composites based on jute and glass fibers: A comparative study on moisture absorption and mechanical properties. Materials Today Communications. V. 22, 100861, 2020.

[15] PANDIAN, A.; SULTAN, M. T. H.; MANIKANDAN, V.; MARIMUTHU, U.; KANAGARAJ, A. P.; KHAN, T. Effect of stacking sequence of glass and jute fiber reinforced polymer composites on their low velocity impact properties. Journal of Composite Materials, v. 56, n. 16, p. 2599-2608, 2022.

[16] PRAVEENA, B. A.; SANTTOSH, N.; ARCHANA, D. P.; BURADI, A.; RAJ, E. F. I.; CHANAKYAN, C.; ELFASAKHANY, A.; BASHEER, D. Influence of Nanoclay Filler Material on the Tensile, Flexural, Impact, and Morphological Characteristics of Jute/E-Glass FiberReinforced Polyester-Based Hybrid Composites: Experimental, Modeling, and Optimization Study. Journal of Nanomaterials. v.2022, p. 1-17, 2022.

[17] RAJAK, D, K.; WAGH, P, H.; LINUL, E. A review on synthetic fiber ofr polymer matrix composites: Performance, failure modes and applications. Material, v.15, n.14, p. 1-28, 2022.

Capítulo 9

Ligas com memória de forma para aplicações em morphing aircraft – uma revisão de literatura

Felipe Silva Lima[1]
Railson de Medeiros Nóbrega Alves[2]
Alan de Oliveira Monteiro[3]

Resumo: Os recentes desenvolvimentos tecnológicos em sistemas aeronáuticos adaptativos (*morphing aircraft*) capazes de reconfigurar sua forma aerodinâmica para a condição ótima de voo vêm sendo impulsionados, principalmente, pela necessidade de melhorar o desempenho de aeronaves. Ao implementarem-se atuadores constituídos por matérias inteligentes como as Ligas com Memória de Forma (LMF), potencializa-se a redução de massa e arrasto, o que leva a uma redução no consumo de combustível das aeronaves e consequentemente das emissões de gases poluentes lançados na atmosfera. Além disso, a incorporação de atuadores alternativos baseados em LMF em tais sistemas proporciona uma maior flexibilidade no *design* do projeto, resultando em benefícios significativos. Este trabalho apresenta uma revisão de pesquisas recentes de LMF em estruturas *morphing*.

Palavras–chave: aeronaves *morphing*; efeito com memória de forma; materiais inteligentes;

[1] Pesquisador do Departamemto de Engenharia Mecânica – UAEM – UFCG
[2] Pós Graduando em Engenharia Mecânica – PPGEM – UFPB
[3] Estudante do Curso de Engenharia Mecânica- UAEM – UFCG

1. INTRODUÇÃO

Reduzir o consumo de energia tornou-se uma prioridade central para diminuir os custos operacionais das aeronaves. Uma maneira eficaz de alcançar isso é melhorar o desempenho aerodinâmico, o que leva à redução do consumo de combustível durante o voo. Aeronaves convencionais enfrentam limitações ao operar em ambientes de voo cada vez mais variados, pois seu desempenho é geralmente otimizado para uma única condição, tornando-se limitadas quando ocorrem variações nas cargas, atitudes ou missões de voo (AJAJ; BEAVERSTOCK; FRISWELL, 2016, BARBARINO *et al*., 2011, FRISWELL, 2014, LI *et al*., 2018). Por exemplo, aeronaves de baixa velocidade precisam de asas com alta razão de aspecto para melhorar a relação sustentação-arrasto (L/D) e reduzir o arrasto aerodinâmico, garantindo maior alcance e menor consumo de combustível. Já aeronaves de alta velocidade, como as supersônicas, necessitam de asas com baixa razão de aspecto e ângulos de varredura acentuados para garantir alta estabilidade e manobrabilidade. Dessa forma, o alcance operacional ideal é limitado pela configuração da asa, o que estimula o desenvolvimento de novos projetos que possam alterar significativamente a aerodinâmica e ampliar a eficiência (AMEDURI e CONCILIO, 2023).

A observação de animais voadores, como os pássaros, mostra que suas asas e caudas mudam de forma conforme eles passam de um voo de alta velocidade para uma manobra rápida e, depois, para um pouso estável (GIULIANI *et al*., 2023, ELZEY; SOFLA; WADLEY, 2003). Essa adaptação lhes permite realizar diferentes tarefas de voo com eficiência ideal em cada condição. Inspirado por esse comportamento, o conceito de ajuste de forma em tempo real para otimização em múltiplos pontos é conhecido como *morphing* (REICH; SANDERS, 2007; SOFLA et al., 2010).

O *morphing* em configurações aeronáuticas refere-se à capacidade eficiente de adaptação de uma estrutura deformável em vários pontos. Essa capacidade permite que a aeronave ajuste sua geometria, o que envolve mudanças significativas nas cargas aerodinâmicas, nas propriedades estruturais e elásticas, nas características inerciais, no comportamento aeroelástico, na dinâmica de voo e na estabilidade (XIAOJUN *et al*., 2021). Em configurações aeronáuticas inovadoras, as asas *morphing* devem ser flexíveis o suficiente para se deformar continuamente e se ajustar às diferentes fases da missão, enquanto ainda suportam as grandes cargas aerodinâmicas resultantes das condições de voo. Conceitos anteriores de *morphing* enfrentaram desafios como maior complexidade, dificuldades de dimensionamento e aumento de peso, especialmente em sistemas com atuadores distribuídos, onde múltiplos atuadores precisavam ser acomodados em um espaço limitado. Essas limitações quase anularam os benefícios aerodinâmicos, retardando sua implementação na aviação por muitos anos (LINGLING *et al*., 2022, PARANCHEERIVILAKKATHIL *et al*., 2024).

Avanços recentes em materiais inteligentes mostram o potencial para superar os desafios de projetar uma asa que seja ao mesmo tempo rígida o suficiente para suportar cargas e flexível o suficiente para ser facilmente deformada. Esses materiais possuem a capacidade de se autoadaptar, autocontrolar ou até mesmo autorreparar em resposta a estímulos externos (BASHEER, 2020, SCHWARTZ, 2008, SUN *et al*., 2016). Estruturas inteligentes, acionadas por uma variedade de materiais como ligas com memória de forma (LMFs), materiais piezoelétricos e magnetoestritivos, têm sido exploradas por projetistas de aeronaves de morfagem. Esse interesse crescente levou à implementação de diversos programas focados em aeronaves leves, flexíveis, inteligentes e otimizadas para múltiplos pontos de operação (ZHU *et al*., 2023). Diferentemente das tecnologias de morfagem

rígidas e mecânicas, as tecnologias flexíveis e estruturais permitem sistemas mais leves, com deformações mais eficientes e contínuas, o que pode atrasar a separação do fluxo de ar, aumentar a sustentação e reduzir o arrasto, o consumo de combustível, o ruído e as emissões.

As pesquisas relacionadas concentram-se principalmente em níveis baixos de prontidão tecnológica (TRL), aplicados especialmente a veículos aéreos em microescala (JODIN *et al*., 2018). As LMFs são capazes de converter energia térmica em tensão mecânica, permitindo que, ao posicionar pares de atuadores LMF dentro de uma estrutura, grandes forças sejam aplicadas e a forma seja modificada ajustando-se a faixa de temperatura de cada atuador (COSTANZA; TATA, 2020; HARTL.; LAGOUDAS, 2007; SELLITTO; RICCIO, 2019). Devido às propriedades intrínsecas desses materiais, os atuadores LMF possibilitam a construção de sistemas mais seguros, leves e menos complexos, além de serem compatíveis com o conceito de aeronaves elétricas do futuro. As aplicações estruturais de LMFs em diversos campos da engenharia são amplamente discutidas em diversos textos de revisão (GANGIL; SIDDIQUEE; MAHESHWARI, 2020; JANI *et al*., 2014; NESPOLI *et al*., 2012; SHREEKRISHNA; NACHIMUTHU; NAIR, 2023; SREEKUMAR *et al*., 2007).

Diversos conceitos sobre a aplicação da nomenclatura *morphing* foram desenvolvidos, com uma visão geral apresentada por Barbarino et al. (2014) e mais recentemente por Rodinò e Maletta (2024). Um exemplo relevante que contrasta com as pesquisas de baixo Nível de Prontidão Tecnológica (TRL) é uma aplicação industrial recente das LMF no programa de pesquisa CLEEN da Boeing. Um dos tópicos desse programa envolve o acionamento de um flap por meio de um tubo de torção de LMF (BENAFAN *et al*., 2019). Questões de segurança foram abordadas por meio do uso de um atuador hidráulico redundante, que também oferece funções de frenagem e amortecimento, permitindo a manutenção do flap defletido sem demanda contínua de energia para atuação. Isso demonstra que os desafios de certificação relacionados ao uso de LMFs podem ser superados, conforme evidenciado pela realização bem-sucedida de uma campanha de testes de voo, atingindo o TRL 7. O artigo Sun *et al*. (2016) fornece uma ampla revisão do estado da arte no que se refere ao uso de materiais inteligentes em aeronaves *morphing*.

O projeto de aeronaves *morphing*, embora promissor, enfrenta grandes desafios devido às condições extremas de operação e à crescente demanda por eficiência e economia. Trata-se de uma área intrinsecamente multidisciplinar, que abrange avanços em aerodinâmica, projeto estrutural, ciência dos materiais, sistemas de controle e técnicas de otimização. Nesse contexto, oferecer uma visão geral dos principais projetos de aeronaves desta natureza torna-se relevante. Dada a complexidade de revisar todos os estudos relacionados, este artigo destaca apenas exemplos representativos, com ênfase em asas de *morphing* aplicadas a aeronaves de asa fixa.

2. ASPECTOS GERAIS DAS LMF

As chamadas Ligas com Memória de Forma (LMF) são uma classe de materiais metálicos que possuem a capacidade de recuperar níveis consideráveis de deformação e retornar à sua forma original quando submetidos a estímulos termomecânicos ou eletromagnéticos adequados (LAGOUDAS, 2008; OTSUKA; WAYMAN, 1999). Devido a essa característica, as LMF demonstram grande potencial para uso em estruturas inteligentes, respondendo e adaptando-se às mudanças no ambiente.

O comportamento de memória de forma resulta da transformação de uma fase de alta temperatura, denominada de austenita (A – geralmente cúbica), para uma fase de menor simetria, chamada de martensita (M – com estrutura tetragonal, ortorrômbica ou monoclínica). Essa transformação não ocorre por difusão atômica, mas por distorção da rede cristalina induzida por tensões de cisalhamento. Esse processo, conhecido como Transformação Martensítica (TM), pode ser irreversível, como observada em aços temperáveis, ou reversível, como nas LMF (ABBASCHIAN, 2010). Nas transformações irreversíveis, como em aços, a mudança ocorre abruptamente durante o resfriamento, formando martensitas em forma de ripas, que permanecem imóveis mesmo com a aplicação de calor ou carga mecânica. Em contraste, nas LMF, a transformação é majoritariamente reversível, sendo geralmente chamada de transformação termoelástica.

O cristal de martensita formado pode assumir uma orientação específica, caracterizando uma variante. Essas variantes são divididas em duas categorias: a martensita maclada, que ocorre quando o material é resfriado sem aplicação de carga, resultando na autoacomodação da estrutura cristalina; e a martensita não maclada, que surge apenas na presença de carregamento, orientando a estrutura cristalina em uma direção preferencial (OLSON; COHEN, 1975). As transformações entre a martensita e a austenita produzem comportamento termomecânico representado por dois efeitos principais: Efeito Memória de Forma (EMF) e Superelasticidade (SE), que serão discutidos mais adiante.

Um aspecto importante nas transformações martensíticas (TM) são as quatro temperaturas em que as transformações de fase ocorrem. Durante o resfriamento, sucede-se a transformação direta, que consiste na mudança de austenita para martensita. O início da transformação ocorre na temperatura Ms (*Martensitic start temperature*) e o término da reação, em que 100% da austenita terá sido transformada, denomina-se de Mf (*Martensitic finish temperature*). Na transformação reversa, de martensita para austenita, as temperaturas de início e fim da reação são denominadas As (*Austenitic start temperature*) e Af (*Austenitic finish temperature*), respectivamente (LAGOUDAS, 2008). No intervalo entre essas temperaturas, ambas as fases coexistem na microestrutura. Essas temperaturas obedecem à seguinte relação, $Mf \leq Ms \leq As \leq Af$.

3. EFEITO DE MEMÓRIA DE FORMA (EMF)

O EMF é a capacidade das LMFs de recuperarem sua forma original quando aquecidas após sofrerem uma deformação mecânica. Esse fenômeno está ligado às transformações de fase martensíticas que ocorrem durante a deformação mecânica e à reversão dessas fases durante o aquecimento subsequente. A compreensão do EMF é aprimorada pela análise do caminho termomecânico ilustrado em um diagrama tensão (σ) – deformação (ε) – temperatura (T) para uma LMF. Inicialmente (Figura 1), a liga, no estado de austenita (ponto 6), é resfriada abaixo da temperatura Ms, resultando em uma martensita maclada (ponto 1). Se o resfriamento atingir temperaturas abaixo de MF, toda a austenita será convertida em martensita. Quando uma tensão maior que um valor crítico (σs) é aplicada, a reorientação das variantes de martensita se inicia, onde as variantes favorecidas se expandem às custas das outras. Esse processo, chamado de reorientação, é concluído quando a tensão atinge σf. Ao remover a tensão, o material descarrega elasticamente do ponto 3 para 4, formando martensita não maclada. Ao aquecer o material acima da temperatura As (trecho 5), a transformação reversa é favorecida, e se a temperatura ultrapassar Af, o material retorna à sua forma original no estado de

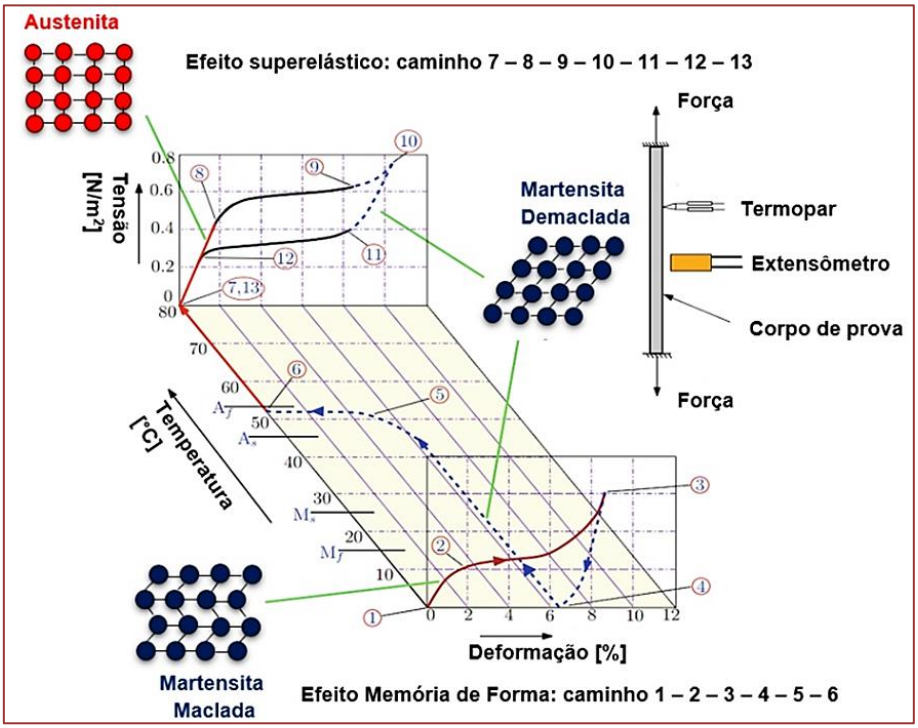
austenita, desde que não tenha havido deformação plástica durante o processo de reorientação (LAGOUDAS, 2008, RAO; SRINIVASA; REDDY, 2015). O processo descrito anteriormente é denominado efeito de memória de forma unidirecional (*one-way memory effect* – OWME).

Algumas ligas exibem o efeito de memória de forma bidirecional (*two-way memory effect* – TWME), o que significa que elas podem memorizar dois formatos distintos: um em baixas temperaturas e outro em altas. No entanto, esse efeito não é uma propriedade intrínseca do material, porém resulta de um processo de treinamento ou condicionamento da liga. Esse treinamento cria uma microestrutura assimétrica, na qual certas variantes de martensita se orientam preferencialmente, impedindo que a transformação termoelástica seja autoacomodada e gerando deformação macroscópica (LAGOUDAS, 2008, RAO; SRINIVASA; REDDY, 2015). Os métodos de treinamento para o TWME envolvem ciclos de tratamentos termomecânicos, que promovem o crescimento preferencial de determinadas variantes de martensita. Esse processo é difícil de realizar em ligas com baixa resistência à fadiga, pois normalmente requer um grande número de ciclos.

4. SUPERELASTICIDADE (SE)

A SE é a habilidade que as LMFs de sofrerem grandes deformações recuperáveis quando aplicada uma tensão sobre o material a uma temperatura constante acima de Af. Nesse fenômeno, o material, inicialmente no estado austenítico, sofre uma transformação martensítica induzida mecanicamente. A partir de um valor crítico de tensão, variantes de martensita de orientações favoráveis começam a se formar no material. A estrutura obtida quando se mantém a carga aplicada na liga é a martensita não maclada. Quando a tensão externa é removida, ocorre a transformação reversa, retornando o material ao estado austenítico, que é termodinamicamente estável nessa temperatura (AURICCHIO *et al.*, 1997). Dessa maneira, a LMF recupera sua forma original, desde que a tensão aplicada não tenha sido suficientemente alta para causar deformação plástica permanente por escorregamento de discordâncias. As tensões associadas à transformação austenita para martensita são superiores às tensões de transformação reversa, martensita induzida para austenita, gerando uma histerese e dissipação de energia pelo material, o que pode ser aproveitado em dispositivos de amortecimento. É importante notar que, caso o carregamento mecânico na LMF ocorra em uma temperatura entre As e Af, há uma mistura entre o efeito superelástico e EMF. A Figura 1 ilustra um ciclo típico de carregamento superelástico.

Figura 1 – Relação tridimensional da tensão, deformação e temperatura para o comportamento mecânico das LMF.

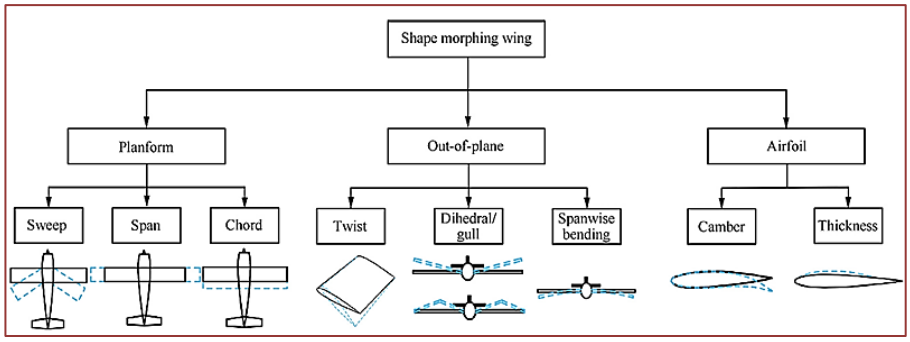


Fonte: Adaptado de Rao, Srinivasa e Reddy (2015).

5. ESTRUTURAS ADAPTATIVAS APLICADAS A AERONÁUTICA

De acordo com a equipe técnica da OTAN (NATO), a morfagem (o termo *morphing* se refere a) é a capacidade de adaptabilidade (adaptação) em tempo real de uma aeronave para possibilitar um desempenho otimizado em múltiplos pontos. Uma aeronave morfante aprimora a autoridade de controle, o desempenho de voo e a capacidade de executar várias missões, ajustando continuamente sua geometria. A geometria refere-se principalmente às superfícies geradoras de sustentação, especialmente as asas da aeronave. As tecnologias de morfagem podem ser classificadas de várias maneiras. As mais populares são de acordo com o grau de liberdade ou funcionalidade. Sofla et al. (2010) e Barbarino et al. (2014), introduziram a categorização com base no grau de liberdade. Eles organizaram os graus de liberdade em alteração no plano (envergadura, enflechamento e corda), alteração fora do plano (torção, flexão e curvatura), e ajuste do aerofólio (espessura e arqueamento), conforme pode ser visualizado na Figura 2. Por outro lado, Ajaj, Beaverstock e Friswell, (2016) utilizaram a funcionalidade como base para categorizar as tecnologias *morphings*. Eles introduziram os conceitos de morfagem contínua e morfagem discreta. Flaps, slats e trens de pouso retráteis podem ser considerados como exemplos de *morphing* discreta, conforme Quadro 1.

Figura 2 – Graus de liberdade de asas *morphings*.



Fonte: Parancheerivilakkathil et al. (2024).

Quadro 1 – Definições de morfagem discreta e contínua.

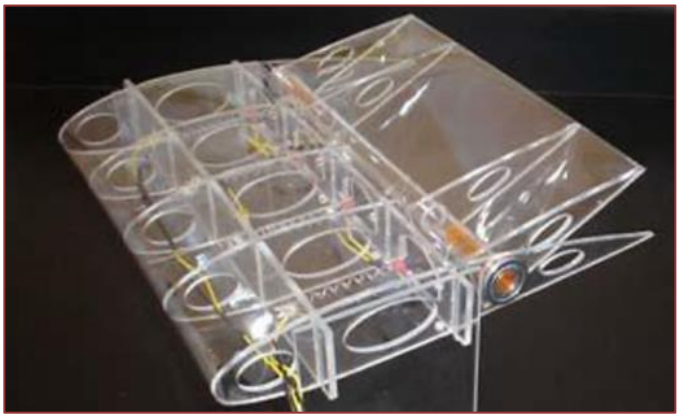
Morfagem Discreta	Morfagem Contínua
• Funcionalidade singular; • Adotada localmente na estrutura da aeronave; • Operada em alguns pontos específicos dentro do envelope de voo; • Suprime acoplamentos.	• Múltiplas funcionalidades • Distribuída por toda a estrutura da aeronave • Operada continuamente ao longo de todo o envelope de voo • Explora acoplamentos

Fonte: Ajaj, Beaverstock e Friswell, (2016).

Hutapea *et al*. (2008) apresentaram um conceito de asa inteligente com flap acionado por molas de LMF que possuem efeito memória de forma. O protótipo, construído em acrílico, foi baseado no perfil NACA-2412 e apresenta um flap rígido que rotaciona em torno de um tubo onde as molas são fixadas. A Figura 3 ilustra o protótipo. Foram analisados a potência necessária para atuação (3,4 A e 1,7 V) e a deflexão máxima alcançada (20°). Análises aerodinâmicas foram conduzidas para estimar o desempenho em voo de cruzeiro, juntamente com testes estáticos para determinar a carga aerodinâmica máxima que o mecanismo suporta (30 N) e testes em túnel de vento a uma velocidade de 21,3 m/s para validação do protótipo.

Brailovski *et al*. (2010) aplicaram atuadores de LMF para controle de forma em um perfil laminar de geometria variável. No projeto, o extradorso estava conectado a dois atuadores com o objetivo de ajustar a geometria e atrasar a transição do escoamento, controlando a sucção e o gradiente adverso de pressão sobre o perfil. Esse ajuste resultou em uma redução média de 18% no arrasto. Contudo, o modelo foi projetado para análise bidimensional e a funcionalidade dos atuadores não foi testada experimentalmente. A Figura 4 apresenta o esquema do modelo com variação geométrica do extradorso e controle da transição.

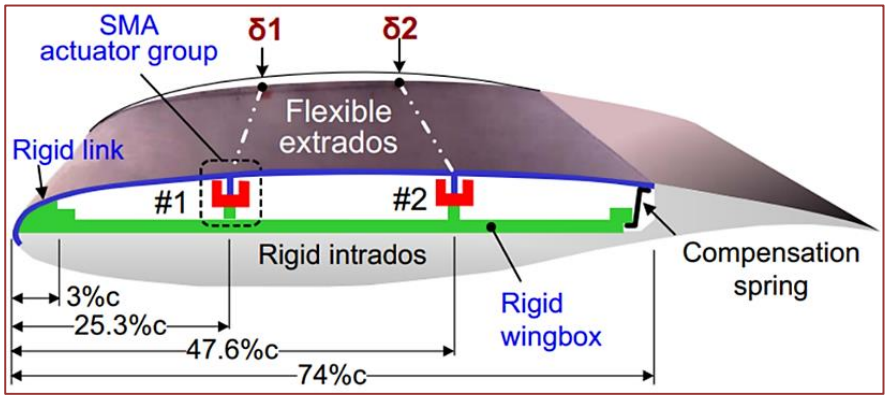
Figura 3 – Protótipo de asa inteligente.



Fonte: Hutapea *et al*. (2008).

Kang *et al*. (2012) desenvolveram um protótipo de seção de asa com uma caixa articulada fixada em longarinas, coberta por uma pele flexível de PVC com 0,3 mm de espessura e acionada por fios de LMF de NiTi. A Figura 5 mostra o protótipo. Quando aquecidos pelo efeito Joule, os fios de LMF se contraem, inclinando a caixa da asa em direção ao bordo de fuga, o que gera uma deflexão contínua desse bordo sem descontinuidades. Após o aquecimento, uma mola convencional restaura a posição inicial do mecanismo de forma passiva. Testes estáticos mostraram que o sistema produziu uma deflexão máxima de 21° com uma corrente de 0,7 A e frequência de 0,1 Hz.

Figura 4 – Modelo com atuadores de LMF no extradorso.

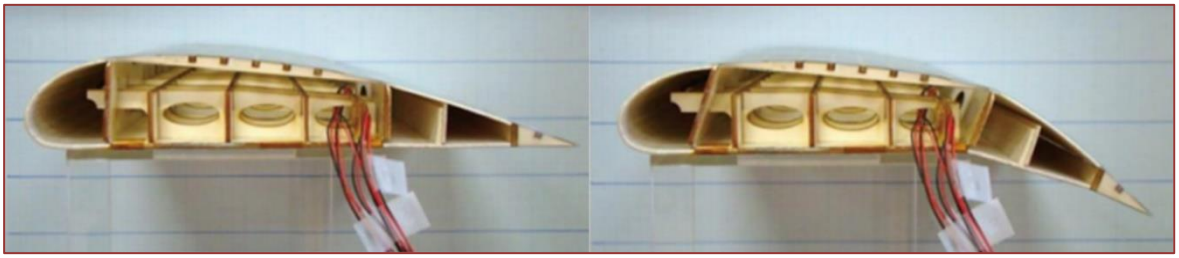


Fonte: Brailovski *et al*. (2010).

Kang *et al*. (2012) desenvolveram um protótipo de seção de asa com uma caixa articulada fixada em longarinas, coberta por uma pele flexível de PVC com 0,3 mm de espessura e acionada por fios de LMF de NiTi. A Figura 5 mostra o protótipo. Quando aquecidos pelo efeito Joule, os fios de LMF se contraem, inclinando a caixa da asa em direção ao bordo de fuga, o que gera uma deflexão contínua desse bordo sem descontinuidades. Após o aquecimento, uma mola convencional restaura a posição inicial

do mecanismo de forma passiva. Testes estáticos mostraram que o sistema produziu uma deflexão máxima de 21° com uma corrente de 0,7 A e frequência de 0,1 Hz.

Figura 5 – Protótipo de uma asa *morphing* demonstrando o estado desativado e ativado.



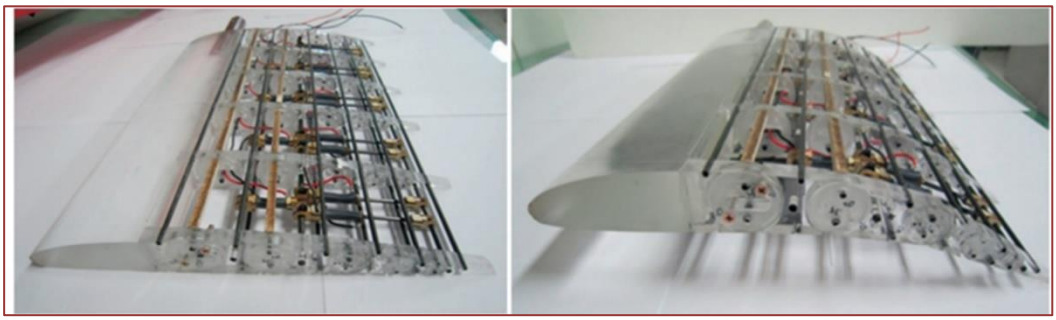
Fonte: Kang *et al*. (2012).

Ko *et al*. (2014) desenvolveram uma asa com *flap morphing* que utiliza molas de LMF como atuadores para modificar o arqueamento do aerofólio. A estrutura é composta por diversos elementos interconectados, permitindo rotações relativas entre elementos adjacentes e formando um contorno suave. A Figura 6 ilustra a nervura do aerofólio, projetada com dois elementos móveis próximos ao bordo de fuga, além da posição das molas de LMF.

Karagiannis *et al*. (2017) propuseram dois conceitos inovadores de atuação para aplicações de *morphing* aeroespacial utilizando LMF. O primeiro conceito envolve uma placa composta com fios de LMF embutidos, controlada por um modelo *Nonlinear Auto Regressive with eXogenous excitation* (NARX) para gerenciar as condições de carregamento em ciclos simples e múltiplos. O segundo conceito explora uma configuração inovadora de nervura, com mecanismos de conformidade projetados para permitir o *morphing* da borda de ataque do aerofólio. Esses mecanismos foram modelados e analisados para otimização da conformidade estrutural.

Jodin *et al*. (2018) apresentaram uma abordagem de otimização multicritério para o projeto conceitual de um *flap* de controle de arqueamento para o *Airbus* A320, comparando tecnologias de revestimento e topologias de atuadores. Entre os atuadores de LMF, uma configuração agonista-antagonista se mostrou mais adequada. Comparações entre revestimentos elásticos e um conceito biomimético inspirado em penas destacaram vantagens ambientais e industriais. A otimização resultou em um design de asa *morphing* leve e eficiente em termos energéticos. Desde 2010, uma plataforma multidisciplinar, envolvendo os laboratórios IMFT e LAPLACE, promove pesquisa nessa área, introduzindo o conceito de "morfismo eletroativo híbrido" que utiliza piezoatuadores e LMF para atuações em diferentes escalas temporais e espaciais. Esse avanço viabiliza uma asa rígida para suportar cargas aerodinâmicas, mas flexível o suficiente para otimizar deformações, mantendo leveza estrutural.

Figura 6 – Projeto da asa que possui um flap mórfico atuado por molas de LMF.



Fonte: Ko *et al*. (2014).

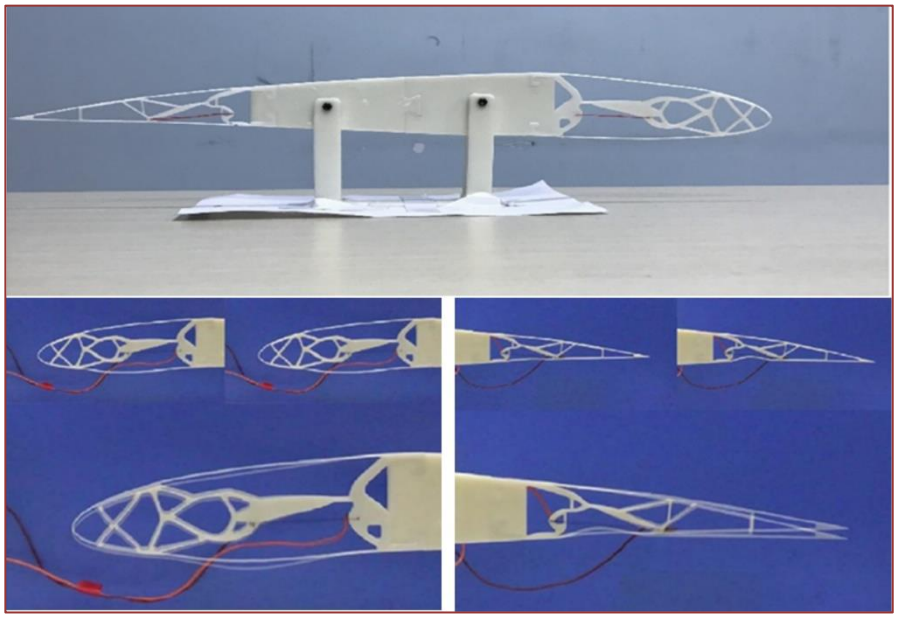
Hajarian *et al*. (2019) estudaram o projeto, análise e teste de um perfil aerodinâmico *morphing* inteligente utilizando fios de LMF para modificar a curvatura por meio do movimento contínuo do bordo de fuga. A pesquisa focou na flexibilidade, implementando um inovador design de viga composta com LMF como atuador, permitindo a aplicação de um perfil *morphing* inteligente. A modelagem e testes mostraram que é possível prever com precisão o deslocamento do perfil aerodinâmico, com um erro médio quadrático de apenas 1,31 mm entre a simulação e os resultados experimentais.

Xiaojun *et al*. (2021), desenvolveram um projeto inovador de layout e otimização de topologia para asas *morphing*, que combina atuadores de LMF e técnicas avançadas de otimização de topologia. Esse método permite otimizar simultaneamente a topologia dos substratos das asas e o layout dos atuadores de fios de LMF. A estrutura da asa morfológica flexível, conforme ilustrado na Figura 7, incorpora elementos biônicos, estruturas em *lattice* e tecnologia de manufatura aditiva. O projeto apresenta uma estrutura de costela (*ribs*) inspirada em espinhas de peixe, onde fios de LMF acionados linearmente promovem deformação bidirecional. Com um arranjo distribuído de atuadores, a asa executa modificações sincronizadas, adotando formatos de asa de pássaro e de U. Ensaios de voo demonstraram a viabilidade operacional dessa asa flexível, capaz de operar sem servos.

Summers *et al*. (2021) apresentam um estudo de caso que inclui um parâmetro dependente e um independente, com o objetivo de otimizar um atuador para possibilitar mudanças geométricas na aeronave sob condições de carga e curso desconhecidos. A magnitude da carga é um parâmetro independente, pois depende da geometria da aeronave e das condições de voo, enquanto o curso necessário para atuação é um parâmetro dependente, diretamente influenciado pela geometria do tubo de torque de LMF, que define as variáveis de otimização e projeto do atuador.

Simiriotis *et al*. (2021) desenvolveram uma metodologia para projetar configurações aeronáuticas inteligentes e deformáveis, capazes de atingir formas-alvo específicas ajustando a temperatura dos atuadores LMF. Essa abordagem inclui um algoritmo robusto para prever a resposta não linear da interação entre a estrutura e o LMF e um método de otimização para determinar os parâmetros estruturais e operacionais ideais para alcançar as formas-alvo. A metodologia de projeto seleciona os parâmetros, como localização dos atuadores e temperatura de operação, considerando condições específicas de carga.

Figura 7 – Deformação da asa de inteligente impressa em 3D.

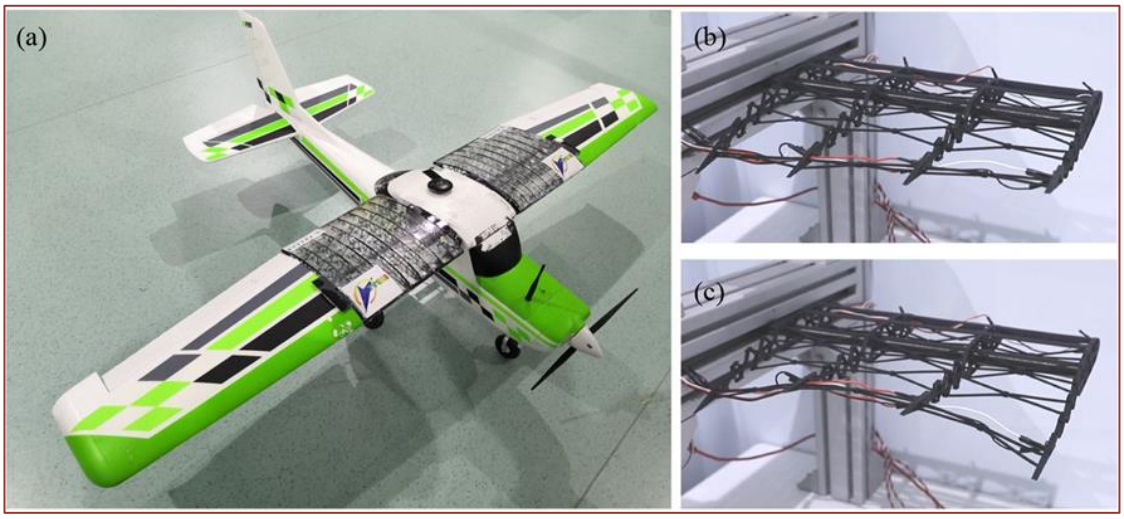


Fonte: Xiaojun et al. (2021).

Zhang *et al*. (2022) destacaram que fitas de LMF com maior área de seção transversal oferecem maior força de saída, resultando em atuação uniforme em superfícies extensas. Isso as torna ideais para aplicações que requerem mudanças de forma consistentes em áreas amplas, como na pele de aeronaves, onde fitas de LMF (30×40 mm) são empregadas para induzir deformação por flexão em placas de aço inoxidável. Essa configuração permite gerar a força necessária para superar a rigidez estrutural da pele da aeronave.

Jiannan *et al*. (2024) investigaram a viabilidade de um protótipo de asa flexível acionado por fios de LMF. A estrutura em formato de espinha de peixe e nervuras impressas em 3D permitiu um morfismo bidirecional com fios de LMF nos lados superior e inferior da asa, comprovando a capacidade multimodal. Análises aerodinâmicas demonstraram uma melhoria significativa na relação sustentação-arrasto (L/D) em relação a asas rígidas. Testes de voo confirmaram a viabilidade das LMF como atuadores e a eficácia de asas flexíveis para ajustar a atitude da aeronave (Figura 8).

Figura 8 – Asas *morphings* flexíveis acionadas por atuadores de fios de liga com memória de forma: (a) asas Asas *morphings* montadas em uma aeronave experimental, (b) morfagem em forma de asa de pássaro e (c) morfagem em forma de U.



Fonte: Jiannan et al. (2024).

No Brasil, diferentes projetos foram desenvolvidos em várias instituições sobre aerofólios acionados por LMF. Na UNESP (Ilha Solteira), foi projetada uma nervura seccionada em 4 partes, acionada por atuadores antagônicos de fios de LMF, com modelagem teórica e experimental de controle de forma utilizando lógica *fuzzy* e lógica booleana (DE ABREU *et al*., 2014). Na UFCG, foi criado um protótipo de seção de asa 3D com perfil NACA 0021, utilizando micromolas de LMF NiTi superelásticas à temperatura ambiente (Emiliavaca *et al*., 2018). No ITA, foram desenvolvidos dois projetos: uma nervura com estrutura flexível (ALMEIDA; SANTOS; OTUBO, 2015) e um aerofólio acionado por molas torcionais (SANTOS, 2019).

6. CONCLUSÕES

Em conclusão, as ligas com memória de forma (LMF) mostram-se promissoras para aplicações aeroespaciais, especialmente em atuadores inteligentes, uma área que demanda soluções inovadoras e configurações eficientes. A necessidade de integrar de forma eficaz as LMF em estruturas aeronáuticas exige uma abordagem de projeto iterativa e multidisciplinar, em razão do comportamento termomecânico não linear dessas ligas e da complexa interação fluido-estrutura. Diversas configurações, como fios, molas, hastes e tubos, já foram desenvolvidas para maximizar o potencial das LMF, contando com ferramentas de análise e projeto para otimizar o desempenho e minimizar o consumo de energia. Alternativas promissoras incluem a utilização de LMF em estruturas multiestáveis e a combinação de métodos de aquecimento ativo e passivo, explorando variações de temperatura ambiente para melhorar a eficiência energética durante o voo.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), através das Bolsas 141742/2019-4 e 161877/2021-4.

Além disso, gostaríamos de agradecer ao Prof. Carlos José de Araújo e a equipe do Laboratório Multidisciplinar de Materiais e Estruturas Ativas da Universidade Federal de Campina Grande pelo apoio e ajuda.

REFERÊNCIAS

[1] ABBASCHIAN, R. Physical Metallurgy Principles. Cengage Learning, 2010. 348 p.

[2] ABREU, G. L. C. M. de; MAESTA, M. F.; LOPES JUNIOR, V.; DE MARQUI JUNIOR, C.; FARIA, C. T.; INMAN, D. J. Active angular control of a sectioned airfoil using shape memory alloys and fuzzy controller. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, v. 37, n. 5, p. 1555-1567, 2015.

[3] AJAJ, R. M.; BEAVERSTOCK, C. S.; FRISWELL, M. I. Morphing aircraft: The need for a new design philosophy. Aerospace Science and Technology, v. 49, p. 154-166, 2016.

[4] ALMEIDA, T. C. D.; SANTOS, O. D. S.; OTUBO, J. Construction of a morphing wing rib actuated by a NiTi wire. Journal of Aerospace Technology and Management, v. 7, n. 4, p. 454-464, 2015.

[5] AMEDURI, S.; CONCILIO, A. Morphing wings review: Aims, challenges, and current open issues of a technology. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, v. 237, n. 18, p. 4112-4130, 2023.

[6] AURICCHIO, F.; TAYLOR, R. L.; LUBLINER, J. Shape-memory alloys: macromodelling and numerical simulations of the superelastic behavior. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, v. 146, n. 3-4, p. 281-312, 1997.

[7] BARBARINO, S.; BILGEN, O.; AJAJ, R. M.; FRISWELL, M. I.; INMAN, D. J. A review of morphing aircraft. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, v. 22, n. 9, p. 823-877, 2011.

[8] BARBARINO, S.; FLORES, E. S.; AJAJ, R. M.; DAYYANI, I.; FRISWELL, M. I. A review on shape memory alloys with applications to morphing aircraft. Smart Materials and Structures, v. 23, n. 6, p. 063001, 2014.

[9] BASHEER, A. A. Advances in the smart materials applications in the aerospace industries. Aircraft Engineering and Aerospace Technology, v. 92, n. 7, p. 1027-1035, 2020.

[10] BENAFAN, O.; MOHOLT, M. R.; BASS, M.; MABE, J. H.; NICHOLSON, D. E.; CALKINS, F. T. Recent advancements in rotary shape memory alloy actuators for aeronautics. Shape Memory and Superelasticity, v. 5, n. 4, p. 415-428, 2019.

[11] BRAILOVSKI, V.; TERRIAULT, P.; GEORGES, T.; COUTU, D. SMA actuators for morphing wings. Physics Procedia, v. 10, p. 197-203, 2010.

[12] COSTANZA, G.; TATA, M. E. Shape memory alloys for aerospace, recent developments, and new applications: A short review. Materials, v. 13, n. 8, p. 1856, 2020.

[13] CHU, Lingling; LI, Qi; GU, Feng; DU, Xintian; HE, Yuqing; DENG, Yangchen. Design, modeling, and control of morphing aircraft: A review. Chinese Journal of Aeronautics, v. 35, n. 5, p. 220-246, 2022.

[14] ELZEY, D. M.; SOFLA, A. Y. N.; WADLEY, H. N. A bio-inspired high-authority actuator for shape morphing structures. In: SMART STRUCTURES AND MATERIALS 2003: ACTIVE MATERIALS: BEHAVIOR AND MECHANICS, 2003, San Diego. Proceedings [...]. SPIE, 2003. v. 5053, p. 92-100.

[15] EMILIAVACA, A.; ARAUJO, C. J. de; SOUTO, C. R.; RIES, A. Characterization of shape memory alloy micro-springs for application in morphing wings. Smart Materials and Structures, v. 28, n. 1, p. 015010, 2018.

[16] FRISWELL, M. I. Morphing aircraft: an improbable dream?. In: Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems, American Society of Mechanical Engineers, 2014. v. 46148, p. V001T08A001. setembro, 2014.

[17] GANGIL, N.; SIDDIQUEE, A. N.; MAHESHWARI, S. Towards applications, processing and advancements in shape memory alloy and its composites. Journal of Manufacturing Processes, v. 59, p. 205-222, 2020.

[18] GIULIANI, M.; DIMINO, I.; AMEDURI, S.; PECORA, R.; CONCILIO, A. Status and perspectives of commercial aircraft morphing. Biomimetics, v. 7, n. 1, p. 11, 2022.

[19] GU, Xiaojun; YANG, Kaike; WU, Manqiao; ZHANG, Y.; ZHU, Jihong; ZHANG, W. Integrated optimization design of smart morphing wing for accurate shape control. Chinese Journal of Aeronautics, v. 34, n. 1, p. 135-147, 2021.

[20] HARTL, D. J.; LAGOUDAS, D. C. Aerospace applications of shape memory alloys. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering, v. 221, n. 4, p. 535-552, 2007.

[21] HAJARIAN, A.; ZAKERZADEH, M. R.; BAGHANI, M. Design, analysis and testing of a smart morphing airfoil actuated by SMA wires. Smart Materials and Structures, v. 28, n. 11, p. 115043, 2019.

[22] HUTAPEA, P.; KIM, J.; GUION, A.; HANNA, C.; HEULITT, N. Development of a smart wing. Aircraft Engineering and Aerospace Technology, v. 80, n. 4, p. 439-444, 2008.

[23] JANI, J. M.; LEARY, M.; SUBIC, A.; GIBSON, M. A. A review of shape memory alloy research, applications and opportunities. Materials & Design (1980-2015), v. 56, p. 1078-1113, 2014.

[24] JIANNAN, Y; ZHANG, Y.; GU, Xiaojun; LI, Jinjian; FANG, Pingchu; YANG, Xinru et al. Bi-direction and flexible multi-mode morphing wing based on antagonistic SMA wire actuators. Chinese Journal of Aeronautics, 2024.

[25] JODIN, G.; TEKAP, Y. B.; SAUCRAY, J. M.; ROUCHON, J. F.; TRIANTAFYLLOU, M.; BRAZA, M. Optimized design of real-scale A320 morphing high-lift flap with shape memory alloys and innovative skin. Smart Materials and Structures, v. 27, n. 11, p. 115005, 2018.

[26] KANG, W. R.; KIM, E. H.; JEONG, M. S.; LEE, I.; AHN, S. M. Morphing wing mechanism using an SMA wire actuator. International Journal of Aeronautical and Space Sciences, v. 13, n. 1, p. 58-63, 2012.

[27] KARAGIANNIS, D.; STAMATELOS, D.; KAPPATOS, V.; SPATHOPOULOS, T. An investigation of shape memory alloys as actuating elements in aerospace morphing applications. Mechanics of Advanced Materials and Structures, v. 24, n. 8, p. 647-657, 2017.

[28] KO, S. H.; BAE, J. S.; RHO, J. H. Development of a morphing flap using shape memory alloy actuators: the aerodynamic characteristics of a morphing flap. Smart Materials and Structures, v. 23, n. 7, p. 074015, 2014.

[29] LAGOUDAS, D. C. Shape memory alloys. Science and Business Media, LLC, 2008.

[30] LI, D.; ZHAO, S.; DA RONCH, A.; XIANG, J.; DROFELNIK, J.; LI, Y. et al. A review of modelling and analysis of morphing wings. Progress in Aerospace Sciences, v. 100, p. 46-62, 2018.

[31] NESPOLI, A.; BESSEGHINI, S.; PITTACCIO, S.; VILLA, E.; VISCUSO, S. The high potential of shape memory alloys in developing miniature mechanical devices: a review on shape memory alloy mini-actuators. Sensors and Actuators A: Physical, v. 158, n. 1, p. 149-160, 2010.

[32] OLSON, G. B.; COHEN, M. Thermoelastic behavior in martensitic transformations. Scripta Metallurgica, v. 9, n. 11, p. 1247-1254, 1975.

[33] OTSUKA, K.; WAYMAN, C. M. (Ed.). Shape memory materials. Cambridge University Press, 1999.

[34] PARANCHEERIVILAKKATHIL, M. S.; PILAKKADAN, J. S.; AMOOZGAR, M.; ASADI, D.; ZWEIRI, Y.; FRISWELL, M. I. A review of control strategies used for morphing aircraft applications. Chinese Journal of Aeronautics, 2024.

[35] RAO, A.; SRINIVASA, A. R.; REDDY, J. N. Design of shape memory alloy (SMA) actuators. Cham: Springer International Publishing, v. 3, 2015.

[36] REICH, G.; SANDERS, B. Introduction to morphing aircraft research. Journal of Aircraft, v. 44, n. 4, p. 1059, 2007.

[37] RODINÒ, S.; MALETTA, C. Design Considerations and Applications of Shape Memory Alloy-Based Actuation in Morphing Structures: A Systematic Review. Progress in Engineering Science, 2024. p. 100021.

[38] SANTOS, A. R. Concepção e avaliação experimental de aerofólios com variação de arqueamento utilizando molas torcionais com efeito memória de forma. 2019. Dissertação (Mestrado) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica.

[39] SCHWARTZ, M. Smart materials. CRC Press, 2008.

[40] SELLITTO, A.; RICCIO, A. Overview and future advanced engineering applications for morphing surfaces by shape memory alloy materials. Materials, v. 12, n. 5, p. 708, 2019.

[41] SHREEKRISHNA, S.; NACHIMUTHU, R.; NAIR, V. S. A review on shape memory alloys and their prominence in automotive technology. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, v. 34, n. 5, p. 499-524, 2023.

[42] SIMIRIOTIS, N.; FRAGIADAKIS, M.; ROUCHON, J. F.; BRAZA, M. Shape control and design of aeronautical configurations using shape memory alloy actuators. Computers & Structures, v. 244, p. 106434, 2021.

[43] SOFLA, A. Y. N.; MEGUID, S. A.; TAN, K. T.; YEO, W. K. Shape morphing of aircraft wing: status and challenges. Materials & Design, v. 31, n. 3, p. 1284-1292, 2010.

[44] SREEKUMAR, M. N. T. S. M. Z. M. M. R.; NAGARAJAN, T.; SINGAPERUMAL, M.; ZOPPI, M.; MOLFINO, R. Critical review of current trends in shape memory alloy actuators for intelligent robots. Industrial Robot: An International Journal, v. 34, n. 4, p. 285-294, 2007.

[45] SUMMERS, C.; WEAVER-ROSEN, J. M.; KARAKALAS, A. A.; MALAK JR, R. J.; LAGOUDAS, D. C. Parametric optimization of SMA torsional actuators for aircraft morphing applications. In: ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Nov. 2021, American Society of Mechanical Engineers. ASME Proceedings, v. 85574, p. V003T03A056.

[46] SUN, J.; GUAN, Q.; LIU, Y.; LENG, J. Morphing aircraft based on smart materials and structures: a state-of-the-art review. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, v. 27, n. 17, p. 2289-2312, 2016.

[47] ZHANG, W.; MA, Y.; GAO, X.; CHEN, W.; NIE, X. Design of a morphing skin with shape memory alloy based on equivalent thermal stress approach. Micromachines, v. 13, n. 6, p. 939, 2022.

[48] ZHU, J.; YANG, J.; ZHANG, W.; GU, X.; ZHOU, H. Design and applications of morphing aircraft and their structures. Frontiers of Mechanical Engineering, v. 18, n. 3, p. 34, 2023.

Capítulo 10

Influência do tratamento térmico e severidade de resfriamento sobre a microestrutura e dureza em pré-formas de AISI 316L-Si obtidas por mada

Júlio Feitosa da Silva Neto[1]
Glauco Ruben de Freitas de Brito[2]
Yuri Emanoel Pereira Dias[3]
Carlos José de Araújo[4]
Gabriel de Castro Coêlho[5]

Resumo: Os tratamentos térmicos são ferramentas cruciais para o aprimoramento das propriedades microestruturais e mecânicas de materiais metálicos produzidos por Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA). Este estudo investiga os efeitos do recozimento na microestrutura e na distribuição de dureza de pré-formas de aço inoxidável austenítico AISI 316L-Si, amplamente utilizado em setores críticos, como as indústrias de petróleo, gás e transporte, devido à sua notável resistência à corrosão e propriedades mecânicas. As amostras foram fabricadas por MADA e submetidas a diferentes condições de recozimento, incluindo variações na temperatura e na taxa de resfriamento. A caracterização microestrutural evidenciou que o recozimento promoveu um refinamento significativo da estrutura de grãos, facilitando a recristalização e o alívio das tensões internas, além de melhorar a homogeneidade microestrutural das peças. A análise da dureza revelou uma redução geral nas regiões previamente expostas a altas taxas de resfriamento durante a fabricação, resultante no crescimento de grãos induzido pelo tratamento térmico. Esse efeito contribuiu para uma distribuição mais uniforme das propriedades mecânicas, mitigando as anisotropias e heterogeneidades típicas da MADA. Os resultados indicam que o recozimento é uma técnica eficaz para otimizar a qualidade das peças, tornando-as mais adequadas para aplicações industriais severas. A pesquisa fornece uma compreensão mais aprofundada dos mecanismos microestruturais associados aos tratamentos térmicos, contribuindo com diretrizes práticas para o aprimoramento do desempenho de componentes fabricados por MADA em ambientes exigentes.

Palavras–chave: MADA, TTPS, Microestrutura, Dureza, AISI 316 L-Si.

[1] Discente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica - CCT – UFCG
[2] Discente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos - CCT – UFCG
[3] Discente do Programa de Pós-Graduação de Engenharia Mecânica - CCT – UFCG
[4] Docente/pesquisador da Unidade Acadêmica Engenharia Mecânica – CCT – UFCG
[5] Docente/pesquisador da Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica – CCT – UFCG

1. INTRODUÇÃO

A Manufatura Aditiva (MA) representa um dos maiores avanços tecnológicos na engenharia de fabricação nas últimas décadas, introduzindo uma abordagem inovadora que combina flexibilidade no design, otimização de processos produtivos e sustentabilidade ambiental. Diferente dos métodos convencionais de fabricação, que frequentemente dependem de processos subtrativos e requerem grandes quantidades de material inicial, a MA permite a fabricação de peças diretamente a partir de modelos digitais tridimensionais, camada por camada. Esse processo não apenas elimina a necessidade de moldes, como também reduz substancialmente o desperdício de material, oferecendo uma solução mais eficiente em termos de recursos e energia (LU et al., 2017). A MA também permite a produção de componentes com geometria complexa e personalizadas, de acordo com as necessidades do cliente, com uma precisão notável, o que tem proporcionado avanços significativos em setores críticos como o aeroespacial, automotivo, biomédico e energético, nos quais as exigências de desempenho e confiabilidade são extremamente altas.

Dentre os diversos processos de MA, a Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA) se destaca como uma técnica particularmente eficiente para a produção de componentes metálicos de grande porte. Este processo utiliza arame metálico como material de adição e uma fonte de calor gerada por um arco elétrico, permitindo a fabricação de peças robustas e de alta qualidade com produtividade elevada. Além disso, a flexibilidade da MADA em termos de ligas metálicas que podem ser processadas torna essa tecnologia uma escolha atraente para uma ampla gama de aplicações industriais exigentes, especialmente aquelas que requerem altos padrões de resistência térmica e mecânica (LIU et al., 2019; WILLIAMS et al., 2016). Comparada a outras técnicas de manufatura aditiva, como a fusão seletiva a laser (SLS), a MADA também oferece uma vantagem significativa em termos de custos, o que torna a tecnologia mais acessível e economicamente viável para projetos de maior escala, ampliando sua aplicabilidade em diversas indústrias.

Embora a MADA apresente diversas vantagens, o processo não está isento de desafios técnicos, particularmente no que diz respeito à anisotropia das propriedades mecânicas e à heterogeneidade microestrutural das peças produzidas. Esses problemas são consequência da solidificação direcional durante a deposição camada por camada e do acúmulo de tensões internas, que podem comprometer a integridade estrutural e o desempenho das peças, especialmente sob condições de operação severas, como altas temperaturas ou exposição a ambientes agressivos. A presença de uma microestrutura não homogênea pode levar a falhas prematuras nas peças, limitando seu uso em aplicações de alta performance (WANG et al., 2022; PEREIRA; HENKE; D'OLIVEIRA, 2018).

Neste contexto, o aço inoxidável austenítico AISI 316L-Si tem se consolidado como uma das ligas mais promissoras para aplicações em MADA devido às suas excelentes propriedades, como resistência à corrosão, alta ductilidade e boa soldabilidade. Essas características tornam o AISI 316L-Si altamente desejável em indústrias que operam em condições extremas, como nos setores de petróleo, gás, química e biomédica, onde os materiais precisam resistir a ambientes agressivos (TARASOV et al., 2019). Contudo, as condições térmicas durante o processo de MADA, combinadas com o resfriamento rápido característico da deposição, podem resultar em microestruturas heterogêneas e tensões residuais, comprometendo as propriedades mecânicas do material e limitando sua aplicabilidade sem intervenções pós-processamento adequadas.

O recozimento envolve o aquecimento do material a uma temperatura controlada seguido de resfriamento lento, promovendo o alívio das tensões internas, a recristalização dos grãos e a uniformização microestrutural. Já a solubilização, que também envolve um aquecimento semelhante seguido de resfriamento rápido, impede a formação de precipitados indesejáveis, como os carbonetos, o que reduz a sensibilização do material e melhora sua resistência à corrosão (VICENTE et al., 2024). Para o aço AISI 316L-Si, esses tratamentos térmicos podem melhorar a resistência à corrosão, reduzir a anisotropia e aumentar a durabilidade das peças, tornando-as mais adequadas para enfrentar as condições desafiadoras dos ambientes industriais.

Apesar do reconhecimento da eficácia desses tratamentos, os efeitos específicos do recozimento e da solubilização em peças produzidas por MADA ainda são pouco estudados, especialmente em relação às condições de processamento específicas, como as temperaturas de tratamento, os tempos de manutenção e as taxas de resfriamento. Compreender essas variáveis e seus impactos nas microestruturas e nas propriedades mecânicas é fundamental para o desenvolvimento de diretrizes práticas que otimizem o desempenho das peças fabricadas por MADA, maximizando sua eficiência e longevidade em ambientes industriais exigentes (SUUTALA et al., 2014; BARBOSA et al., 2015).

Este estudo tem como objetivo investigar, de forma sistemática, os efeitos dos tratamentos térmicos de recozimento e solubilização sobre a microestrutura e a dureza de pré- formas de aço inoxidável AISI 316L-Si produzidas por MADA. Focando nas variações das taxas de resfriamento, a pesquisa busca fornecer uma análise detalhada dos mecanismos microestruturais envolvidos, bem como suas relações com as propriedades mecânicas e funcionais das peças. Espera-se que os resultados deste estudo contribuam significativamente para o avanço do conhecimento na área, fornecendo diretrizes importantes para otimizar o desempenho e a durabilidade das peças produzidas por MADA, além de expandir o uso dessa tecnologia em diversas aplicações industriais, incluindo aquelas de alto desempenho e em ambientes severos.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste estudo, utilizou-se como substrato uma chapa de aço ABNT 1020 com dimensões de 6 mm de espessura, 50 mm de largura e 180 mm de comprimento. Como metal de adição, foi empregado o fio de aço inoxidável austenítico ER316L-Si, com diâmetro nominal de 1,2 mm. A proteção gasosa foi garantida pelo uso de argônio (*Ar*) comercialmente puro (99,8%), conforme especificado pelas normas técnicas aplicáveis. A Tabela 1 apresenta a composição química nominal do fio AISI 316L-Si, de acordo com as especificações fornecidas pelo fabricante.

A deposição foi realizada utilizando o processo de soldagem GMAW (*Gas Metal Arc Welding*) no modo de transferência por curto-circuito controlado (CCC). O equipamento utilizado foi composto por uma fonte de alimentação *IMC Digiplus A7*, acoplada a um alimentador de arame *IMC STA 20-D*. Para garantir precisão e controle do deslocamento da tocha de soldagem, foi empregada uma mesa cartesiana CNC com deslocamento tridimensional.

Tabela 1 – Composição nominal do AISI 316 L-Si.

%C	%C%	%Ni	%Mo	%Mn	%Si	%P	%S	%Cu
0,03 Máx.	18,0 20,0	11,0 - 14,0	2,0 - 3,0	1,0 - 2,5	0,65 - 1,0	0,03 Máx.	0,03 Máx.	0,75 Máx.

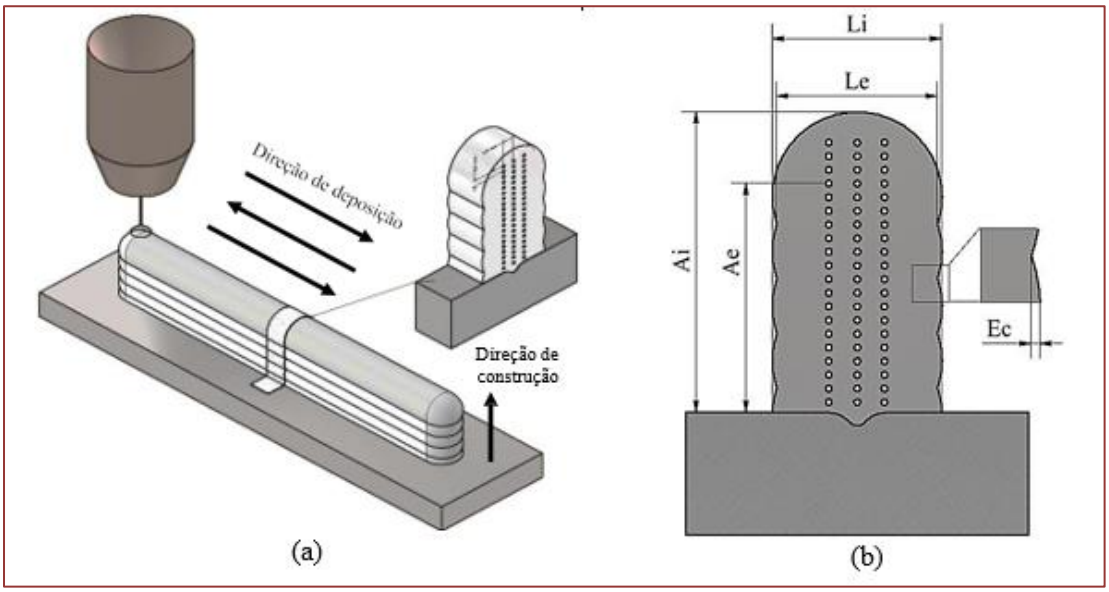
Os parâmetros de soldagem foram mantidos constantes: velocidade de soldagem de 300 mm/min, corrente de pico de 250 A, corrente de trabalho de 80 A, distância entre o bico de contato e a peça de 10 mm, fluxo de gás de proteção de 18 L/min e temperatura de intercaladas de 100 ºC. A temperatura entre deposições (interpasse) foi controlada por uma pistola térmica de infravermelho. As pré-formas metálicas foram fabricadas e os parâmetros de tratamento térmico (temperatura de austenitização, tempo e severidade de resfriamento) foram variados de acordo com a Tabela 2. O resfriamento lento consistiu no desligamento do forno para que a mostra resfriasse próxima ao equilíbrio termodinâmico, como num recozimento. Já o resfriamento rápido consistiu na retirada da amostra do forno e de sua imersão em água agitada à temperatura ambiente.

Tabela 2 – Parâmetros de variação das amostras tratadas.

Amostra	Temperatura/Tempo/Resfriamento
1	Como fabricado
2	700°C – 60 min – Lento
3	700°C – 60 min – Rápido
4	1050°C – 30 min – Lento
5	1050°C – 30 min – Rápido

A Figura 1(a) esquematiza o processo de deposição por MADA, acoplado à fonte de soldagem GMAW. Cada cordão de solda teve um comprimento útil de 120 mm, com seis passes de deposição alternados em relação à direção de deposição (direção de construção) e com um ângulo de soldagem de 90°, com incremento de 3 mm entre os passes.

Figura 1 – (a) Esquema de pré-forma acabada, com retirada de amostra para análise metalográfica e (b) ensaio de dureza Vickers.



Para a análise metalográfica, as amostras dos depósitos passaram por um processo de preparação que incluiu lixamento com lixas de granulações entre 100 e 2400, seguido de polimento. O polimento foi realizado com uma politriz marca *Teclago PLO2 E*, utilizando alumina de 2 mícrons e sílica coloidal de 0,04 mícrons. O processo de polimento foi conduzido de maneira manual e aleatória para evitar orientações preferenciais de riscos. Antes do polimento, as amostras foram limpas com água corrente e álcool 90% para remoção de resíduos.

O ataque metalográfico foi realizado utilizando uma solução eletrolítica de ácido oxálico a 10%, aplicando-se uma voltagem de 1,5 V por 50 segundos para revelar as microestruturas das amostras.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 2, são apresentadas as variações nas fases microestruturais da matriz de solidificação do aço inoxidável AISI 316 L-Si nas cinco amostras, com e sem tratamento térmico. Observa-se uma mudança na morfologia colunar dendrítica e nos contornos de grão, dependendo do método de recozimento, influenciando a redistribuição e estabilização das fases austeníticas e, em menor grau, da ferrita-δ remanescente da solidificação inicial.

A amostra 1, sem tratamento térmico, apresenta grãos colunares alinhados com a direção de solidificação, com braços dendríticos primários e secundários, típicos de materiais obtidos por MADA. Esse padrão é resultado do arraste da poça de fusão ao longo da trajetória de impressão, formando uma solidificação anisotrópica, conforme discutido por WANG et al. (2022).

Para a amostra 2, recozida a 700 °C por 60 min com resfriamento lento, nota-se uma estrutura mais homogênea, com redistribuição dos contornos de grão e espaçamento uniforme dos braços dendríticos. Esse tratamento reduziu tensões internas e defeitos cristalinos, promovendo refinamento de grãos e estabilidade térmica. Nos aços austeníticos, o recozimento pode transformar parte da ferrita-δ residual em austenita, melhorando a homogeneidade estrutural e resistência à corrosão, como observado por ABDULKARIM et al. (2017).

A amostra 3, recozida a 700 °C por 60 min com resfriamento rápido, reteve grãos colunares e exibe redução nos braços dendríticos secundários, indicando solidificação que favorece a fase austenítica e reduz a formação de ferrita-δ nos contornos de grão, resultado do resfriamento rápido que inibe a precipitação dessa fase indesejada, como relatado por MURR et al. (1990).

As amostras 4 e 5, submetidas a tratamento térmico de solubilização com austenitização a 1050°C por 30 min e resfriamento lento e rápido, respectivamente, mostraram diferenças significativas na quantidade de ferrita-δ e na homogeneidade dos contornos de grão. Na amostra 4 (resfriamento lento), houve maior precipitação de ferrita-δ e uma microestrutura mais uniforme, com grãos austeníticos maiores e contornos mais regulares, favorecidos pela redistribuição gradual dos elementos de liga e menor suscetibilidade à corrosão intergranular PENOT et al. (2023). Em contraste, a amostra 5 (resfriamento rápido) exibiu menor homogeneidade nos contornos de grão e uma leve estrutura dendrítica, indicando que a taxa de resfriamento limita o rearranjo de fases e a redistribuição dos elementos.

As fases austenita (γ) e ferrita (δ) podem ser observadas a partir da estrutura dendrítica colunar, demonstrando que a morfologia dos grãos reflete diretamente as condições térmicas associadas aos tratamentos de recozimento e normalização Xu et al. (2017). Durante o recozimento, o aquecimento a temperaturas elevadas seguido por resfriamento controlado promove a homogeneização microestrutural, reduzindo tensões internas e recristalizando os grãos. Por outro lado, o tratamento de normalização, caracterizado por um resfriamento em ar, favorece a formação de grãos equiaxiais e melhora a uniformidade das fases presentes no material.

Esses resultados confirmam que tanto a taxa de resfriamento, quanto o regime de recozimento exercem influência significativa sobre a evolução microestrutural, favorecendo ajustes de fase e homogeneidade estrutural nas pré-formas de AISI 316 L-Si. A manipulação do recozimento e do resfriamento se mostra, portanto, um fator determinante para o controle da microestrutura e das propriedades mecânicas em componentes manufaturados aditivamente, o que pode ser explorado para otimizar a performance final e a durabilidade em aplicações críticas.

Figura 2 – Microscopia Óptica Metalográfica das pré-formas nos estados em análise: Estado Bruto; 700°C - 60 min – resfriamento lento; 700°C - 60 min – resfriamento rápido; 1050°C – 30 min – resfriamento lento; 1050°C – 30 min – resfriamento rápido.

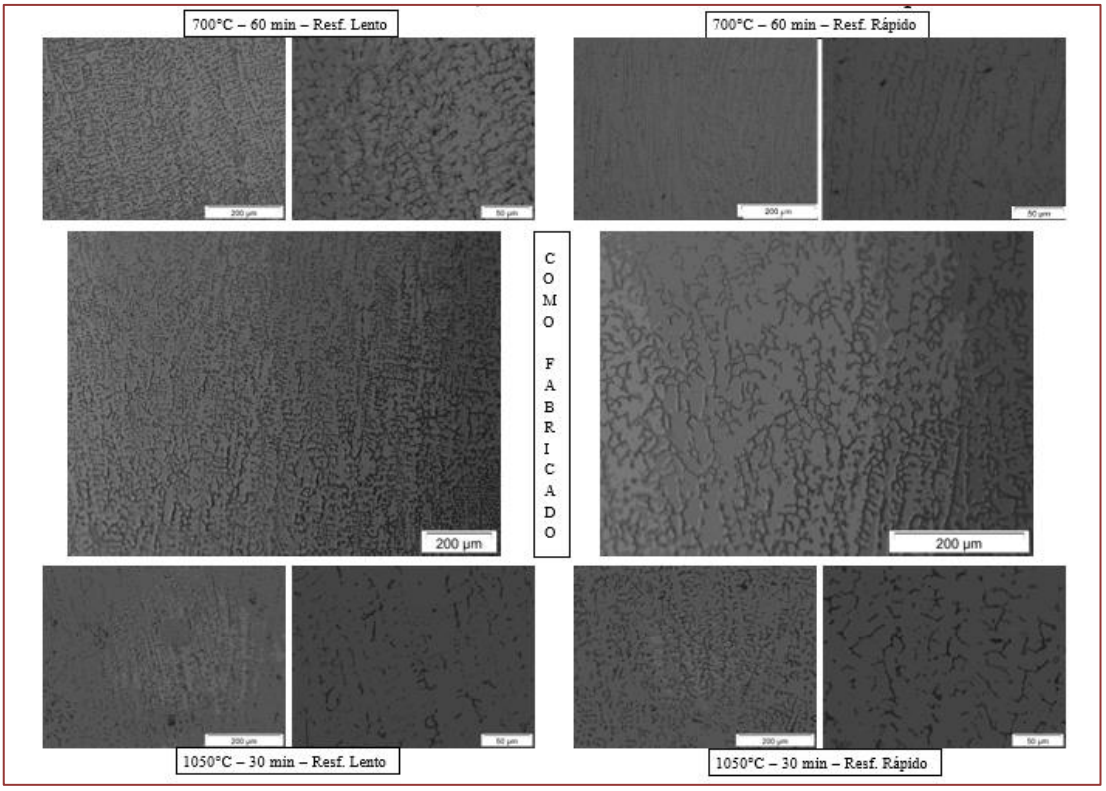
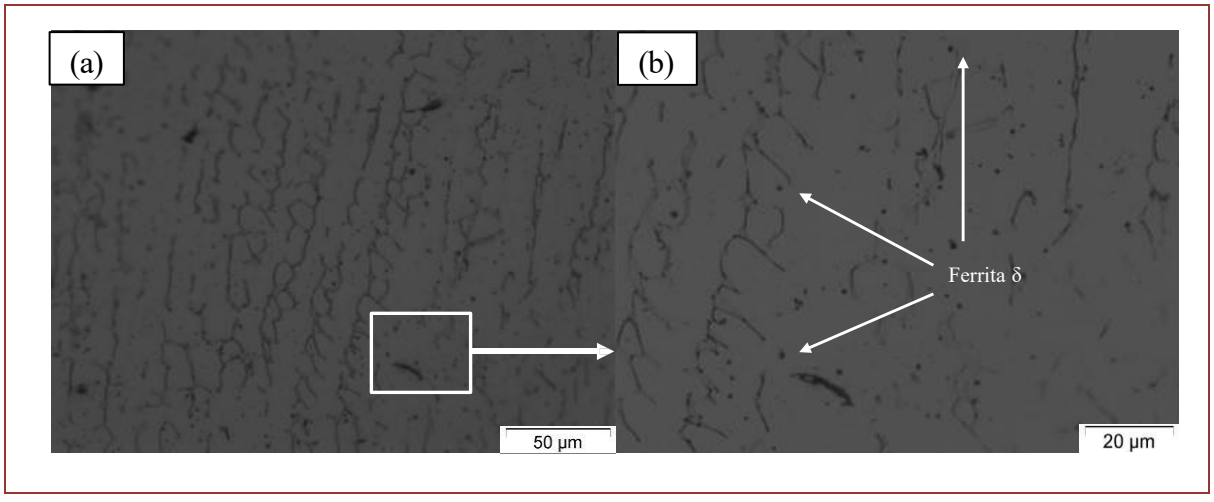


Figura 3 - Microscopia da amostra submetida ao tratamento de 700°C – 60 min – resfriamento rápido, com a presença de ferrita delta.

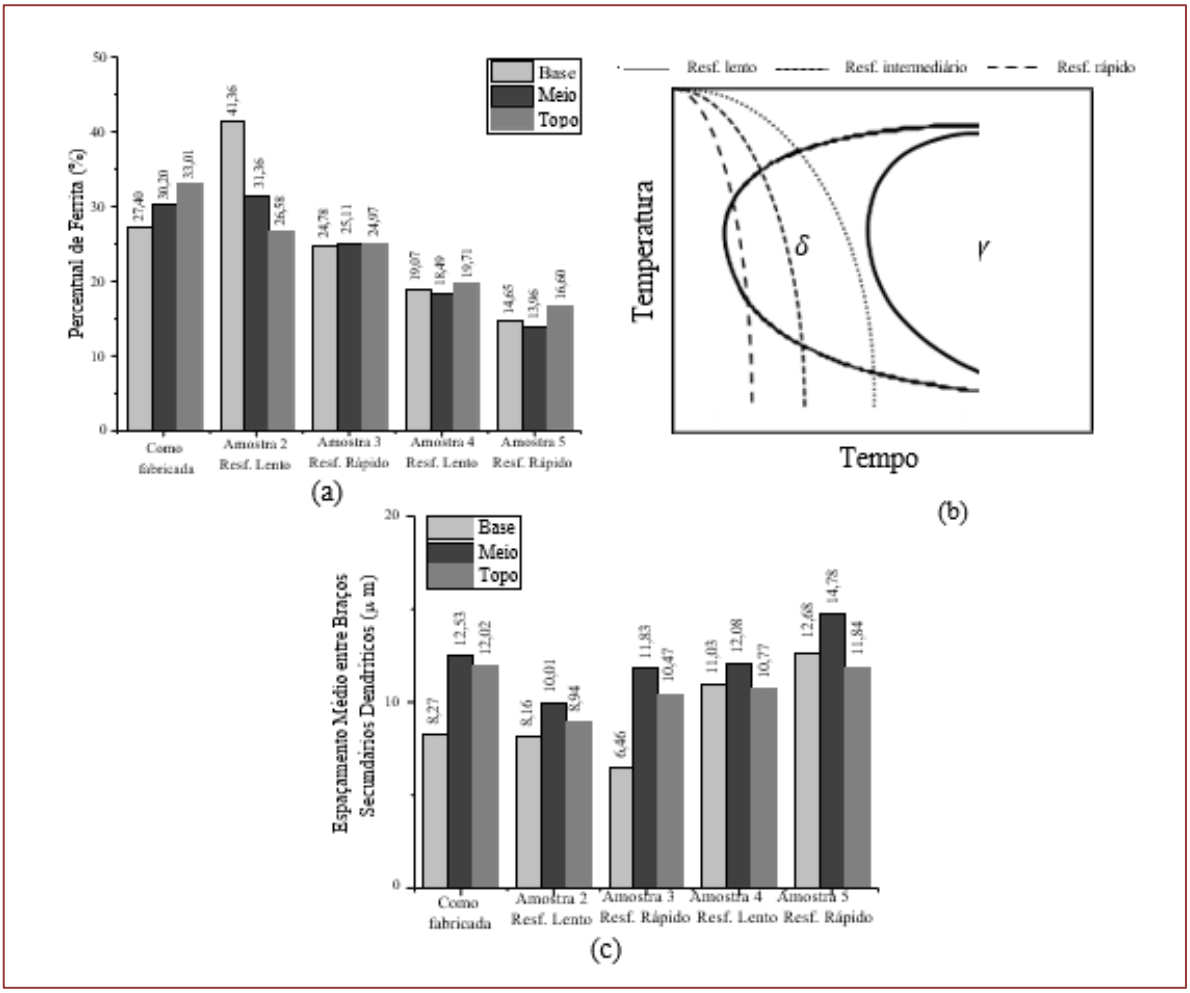


Para inferir quantitativamente o teor de ferrita-δ em cada uma das amostras, uma correlação foi feita através do software ImageJ®, correlacionando a fração volumétrica desta fase com os pixels observados. De forma comparativa, a Figura 3(a) mostra o teor de ferrita-δ nas cinco amostras. Na condição sem tratamento térmico (como fabricado), tem-se maior teor de ferrita-δ nas últimas camadas depositadas (topo) e este vai progressivamente diminuindo em direção às primeiras camadas (base). Isto acontece porque, nos processos de MADA, as primeiras camadas possuem maior volume de material para dissipação do calor gerado pelo processo de fundição por arco elétrico, graças ao substrato. Isto gera um resfriamento mais rápido, conforme ilustrado na Figura 3(b) em função de uma curva CCT, resultando em menor percentual de ferrita-δ. À medida que novas camadas vão sendo depositadas e vai-se distanciando do substrato, o volume para dissipação do calor nas adjacências vai diminuindo, o que vai progressivamente gerando uma curva de resfriamento mais lenta, propiciando condições difusionais favoráveis a precipitação de maiores teores de ferrita-δ.

Com relação às amostras tratadas termicamente, pôde-se observar que o resfriamento teve grande influência no teor de ferrita. Para os tratamentos térmicos com austenitização a 700°C e tempo de 60min, o resfriamento lento (amostra 2) propiciou uma variação do teor de ferrita na amostra ao longo da direção de construção (base ao topo), enquanto o resfriamento rápido (amostra 3) igualou as taxas de resfriamento entre as regiões da seção transversal da amostra, gerando praticamente o mesmo teor de ferrita-δ ao longo da amostra. Já para os tratamentos térmicos com austenitização a 1050 °C e tempo de 30 min, tanto o resfriamento lento quanto rápido propiciou a equalização do teor de ferrita-δ ao longo da direção de construção, devido à maior magnitude da temperatura, mas o resfriamento rápido se mostrou mais propício a formação de menores teores, já que gera uma curva de resfriamento mais rápida.

Outra modificação também observada foi a modificação do espaçamento entre os braços secundários dendríticos de ferrita-δ. A Figura 3(c) mostra os valores médios da distância entre os braços secundários para cada região das amostras.

Figura 3 – (a) Percentual de ferrita presenta nos contornos de grão das amostras em análise. (b) Esquema de curva CCT e taxas de resfriamento. (c) Espaçamento médio entre os braços secundários dendríticos.



A dureza das ligas metálicas produzidas por Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA) é fortemente influenciada por vários fatores térmicos, sendo que a temperatura de austenitização e a taxa de resfriamento são os principais responsáveis pela formação e distribuição das fases no material. A composição química do material também desempenha um papel crucial, pois determina a formação de fases como ferrita, martensita e carbeto, que têm um impacto direto nas propriedades mecânicas, como dureza e resistência ao desgaste (Costa et al., 2024).

Individualmente, quanto maior o teor de ferrita-δ, menor a dureza, graças à sua alta ductilidade (RAUT; TAIWADE; AGARWAL, 2023). Também, quanto menor for o espaçamento entre os braços dendríticos, maior a dureza (COSTA et al., 2024), já que estes braços atuam como barreiras impedindo o movimento de discordâncias. A interação destes mecanismos gera um perfil de dureza complexo ao longo da altura de construção das pré-formas, conforme mostrado na Figura 4, onde a dureza média (HV_{med}) de cada região também é mostrada. É perceptível que para os tratamentos térmicos à 700 °C e 60 min, o resfriamento rápido (amostra 3) diminui a variação da dureza ao longo da altura de construção, apesar resultar uma dureza média menor quando

comparado ao resfriamento lento (amostra 2). Já para os tratamentos térmicos à 1050 °C e 30 min, a média de dureza praticamente não se alterou entre o resfriamento lento (amostra 4) e rápido (amostra 5), haja visto que tanto o teor médio de ferrita quanto a média do espaçamento entre braços dendríticos secundários pouco se alterou entre as regiões.

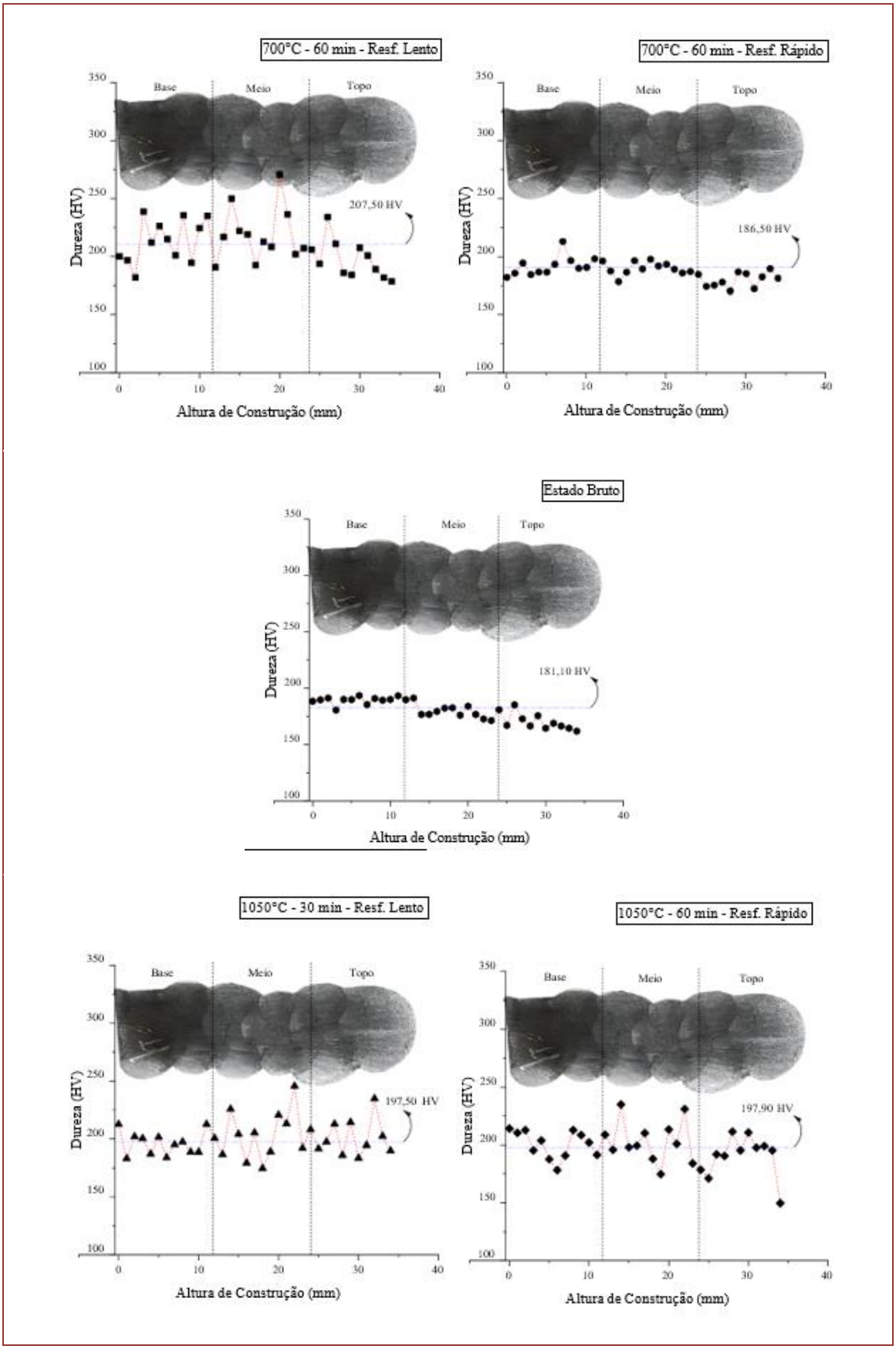
O controle do resfriamento, seja rápido ou lento, altera significativamente a microestrutura das peças. O resfriamento rápido tende a promover uma solidificação mais uniforme, o que reduz a variação da dureza ao longo da altura da peça e gera uma microestrutura mais homogênea e, consequentemente, menos resistente a altas solicitações mecânicas. Em contrapartida, o resfriamento lento pode favorecer a formação de fases endurecedoras, como ferrita-δ e carbetos, o que pode resultar em heterogeneidades microestruturais e anisotropias nas propriedades mecânicas, afetando a resistência à tração, à fadiga e a durabilidade, aspectos essenciais para componentes em aplicações de alta performance, como na indústria aeronáutica e automotiva (Suutala et al., 2014).

Além das diferenças provocadas pelo modo de resfriamento, os tratamentos térmicos realizados em altas temperaturas, como o recozimento a 1050 °C, têm o potencial de atenuar as variações microestruturais, promovendo uma maior homogeneização do material. O efeito desses tratamentos é particularmente importante porque favorece a dissolução de fases indesejáveis, como a ferrita e os carbetos, que se formam durante a solidificação e podem comprometer a tenacidade e a resistência ao desgaste. Ao dissolver essas fases, o material obtém uma matriz mais uniforme, o que resulta em melhores propriedades mecânicas, especialmente em termos de resistência e tenacidade (Costa et al., 2024).

Além das fases formadas, outro fator de grande importância são as tensões internas acumuladas durante o processo de deposição e solidificação. Essas tensões residuais podem gerar anisotropia nas propriedades mecânicas e contribuir para falhas prematuras, principalmente quando o material é submetido a cargas cíclicas, como em ambientes de operação que envolvem variações térmicas e mecânicas. A presença dessas tensões internas pode ser prejudicial, especialmente em componentes críticos usados em setores como o de petróleo, gás e transporte, onde a resistência à fadiga e a durabilidade são essenciais (Suutala et al., 2014).

O controle adequado das tensões internas e a otimização dos parâmetros de resfriamento e tratamentos térmicos são, portanto, fundamentais para garantir o desempenho a longo prazo das peças produzidas por MADA. A redução das anisotropias e heterogeneidades microestruturais assegura uma maior consistência nas propriedades mecânicas, tornando os componentes mais confiáveis e duráveis (Barbosa et al., 2015).

Figura 4 – Perfis de microdurezas obtidos para cada amostra.



4. CONCLUSÕES

Neste estudo, foi investigada a influência do tratamento térmico e da taxa de resfriamento nas pré-formas de AISI 316L-Si fabricadas por MADA. Os resultados obtidos permitem concluir:

- Evolução microestrutural: Tanto a taxa de resfriamento quanto o regime de recozimento tiveram um impacto significativo, promovendo ajustes de fase e homogeneização estrutural. Isso evidencia o potencial dessas variáveis para refinar as propriedades das pré- formas.
- Distribuição de ferrita-δ: Em temperaturas de austenitização mais baixas, o resfriamento lento levou a variações de teor de ferrita-δ ao longo da direção de construção, enquanto o resfriamento rápido minimizou essas diferenças, uniformizando o teor de ferrita-δ entre as regiões. Em temperaturas mais altas, a distribuição de ferrita-δ tornou-se homogênea, independentemente da taxa de resfriamento.
- Comportamento da dureza: Para temperaturas de austenitização mais baixas, o resfriamento rápido reduziu as variações de dureza ao longo da altura de construção, mas resultou em uma dureza média inferior ao resfriamento lento. Em temperaturas mais altas, a média de dureza foi similar entre os regimes de resfriamento, refletindo a estabilização tanto do teor médio de ferrita quanto do espaçamento entre braços dendríticos secundários.

Essas observações demonstram a relevância do controle térmico e do resfriamento na otimização das propriedades microestruturais e mecânicas, fornecendo diretrizes importantes para a fabricação de pré-formas por MADA.

AGRADECIMENTOS

Esta pesquisa foi financiada pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq, através dos processos 409585/2022-0 e 408253/2022-3. Ao Laboratório de Soldagem (LabSol) multiusuário da Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica (UAEM) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) pelo empréstimo de máquinas e equipamentos. Os autores gostariam de agradecer também ao Núcleo Avançado em Fratura, Fadiga e Integridade Estrutural (NAFFIE) e ao Laboratório Multidisciplinar de Materiais e Estruturas Ativas (LaMMEA) pelo apoio ao desenvolvimento e infraestrutura.

REFERÊNCIAS

[1] BARBOSA, R. P. et al. Recristalização de um Aço Inoxidável Austenítico/ Uma Abordagem Estatística. [s.l: s.n.].

[2] COSTA, J. N. et al. Evaluation of near immersion active cooling on the microstructure and mechanical properties of AISI 316L stainless steel obtained with additive manufacturing by DED-Arc. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 134, n. 3–4,

[3] p. 1419–1432, 1 set. 2024.

[4] ELMER, J. W.; ALLEN, S. M.; EAGAR, T. W. Microstructural Development during Solidification of Stainless Steel Alloys. [s.l: s.n.].

[5] LIU, W. et al. Compulsively constricted WAAM with arc plasma and droplets ejected from a narrow space. Additive Manufacturing, v. 27, p. 109–117, 1 maio 2019.

[6] LU, X. et al. Open-source wire and arc additive manufacturing system: formability, microstructures, and mechanical properties. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 93, n. 5–8, p. 2145–2154, 1 nov. 2017.

[7] PEREIRA, H. C. B.; HENKE, S. L.; D'OLIVEIRA, A. S. C. M. IN625 multilayers

[8] characterization deposited by CMT. Soldagem e Inspecao, v. 23, n. 2, p. 235–246, 1 abr. 2018.

[9] RAUT, L. P.; TAIWADE, R. V.; AGARWAL, A. Investigation of microstructural and corrosion behavior of 316LSi structure developed by wire arc additive manufacturing. Materials Today Communications, v. 35, 1 jun. 2023.

[10] SUUTALA, N. Effect of Solidification Conditions on the Solidification Mode in Austenitic Stainless Steels. [2012].

[11] TARASOV, S. Y. et al. Microstructural evolution and chemical corrosion of electron beam wire-feed additively manufactured AISI 304 stainless steel. Journal of Alloys and Compounds, v. 803, p. 364–370, 30 set. 2019.

[12] VICENTE, A. A. et al. The possible solidification modes of austenitic stainless steels joints according to different chemical compositions and cooling rates. Welding International, v. 38, n. 3, p. 187–197, 2024.

[13] WANG, C. et al. Anisotropy of microstructure and corrosion resistance of 316L stainless steel fabricated by wire and arc additive manufacturing. Corrosion Science, v. 206, 1 set. 2022.

[14] WILLIAMS, S. W. et al. Wire + Arc additive manufacturing. Materials Science and Technology (United Kingdom), v. 32, n. 7, p. 641–647, 21 jun. 2016.

[15] WU et al. 2019. Forming process, microstructure, and mechanical properties of thin-walled 316L stainless steel using speed-cold-welding additive manufacturing, Metals, MDPI, Vol. 9 No. 1, p. 109.

[16] XU, et al. Morphologies, microstructures, and mechanical properties of samples produced using laser metal deposition with 316 L stainless steel wire, Optics and Lasers in

[17] Engineering, Elsevier, Vol. 94, pp. 1–11.

Capítulo 11

Processo de separação sólido-fluido via CFD: efeito da velocidade de injeção de partículas no hidrociclone

Josedite Saraiva de Souza[1]
Severino Rodrigues de Farias Neto[2]
Antonio Gilson Barbosa de Lima[3]
Fabiana Pimentel Macêdo Farias[4]

Resumo: Na indústria de mineração, as técnicas de modelagem matemática e simulação são essenciais para dimensionar equipamentos de processo, visando a otimização, especialmente nas etapas de britagem e moagem. O desempenho dos hidrociclones é influenciado por suas dimensões, pelas variáveis operacionais e pelas propriedades físicas dos sólidos e da polpa. Devido à complexidade dos fenômenos associados ao processo, a representação exata do desempenho de equipamentos baseia-se na qualidade das calibrações efetuadas que dependem de dados representativos da operação modelada, com ajuste nos modelos. O presente trabalho estuda o processo de separação em hidrociclone, considerando escoamento bifásico, turbulento, incompressível, estacionário e isotérmico. Utilizou-se o modelo de turbulência RNG k-épsilon para avaliar a hidrodinâmica do escoamento e os parâmetros quantitativos de desempenho na separação de partículas sólidas e fluido. Realizou-se uma avaliação da hidrodinâmica do hidrociclone e da eficiência de separação utilizando simulação numérica CFD com o software comercial Ansys Fluent 21.0. As equações governantes e as condições de contorno foram resolvidas utilizando o método de volumes finitos (FVM), empregando o esquema de discretização QUICK e o método PRESTO para o cálculo da pressão. O acoplamento pressão-velocidade foi feito utilizando o algoritmo SIMPLE, com ênfase na indústria de mineração. A partir dos resultados obtidos, avaliou-se o campo de pressão, o perfil de velocidade e linhas de fluxo no interior do hidrociclone, possibilitando quantificar a eficiência do equipamento, que alcançou 99,5%.

Palavras–chave: eficiência de separação; Fluent; mineração

[1] Pesquisadora Pós-Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Processos - CCT - UFCG
[2] Docente da Unidade Acadêmica de Engenharia Química - CCT - UFCG
[3] Docente da Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica - CCT - UFCG
[4] Docente da Unidade Acadêmica de Tecnologia do Desenvolvimento - UATEC - CDSA

1. INTRODUÇÃO

Os hidrociclones são dispositivos constituídos por uma parte cilíndrica e outra cônica. A polpa mineral (minério fragmentado + água) é alimentada sob pressão, criando um fluxo descendente em espiral ao longo de sua parede interna. Um fluxo ascendente também é gerado devido à formação de uma região de baixa pressão na parte central do equipamento. Neste processo de separação, as partículas mais finas, juntamente com maior parte da fase líquida, são direcionadas para o centro do hidrociclone e saem por um cilindro na parte superior do aparelho, denominado *vortex finder*, constituindo o *overflow*. Consequentemente, as partículas mais pesadas saem pela parte inferior, denominada de *underflow*.

Esse mecanismo de separação acarreta a classificação granulométrica de partículas e apresenta vantagens em relação a outros equipamentos que exercem a mesma função, ou seja, tem elevada capacidade de processamento, inexistência de peças móveis, facilidade de controle operacional, baixo investimento e fácil manutenção (FARIAS *et al.*, 2011; VALADÃO *et al*. 2007; SOUZA *et al*. 2015; SVAROVSKY, 1981).

Wang *et al*. (2024) estudaram como o ângulo de contato afeta a eficiência de separação através de simulações numéricas e experimentos de CFD. Eles também propuseram métodos de controle de interface para melhorar a separação de micropartículas em hidrociclones. Para resolver as equações usaram o método de volumes finitos, QUICK para discretização e o algoritmo SIMPLE foi empregado para o acoplamento pressão-velocidade. Comparado com o teste de Velocidade Doppler a Laser (LDV), o modelo de turbulência RSM mostrou erros de 10,4% e 37,04% para as velocidades tangencial e axial, respectivamente. O modelo de arraste, combinado com o modelo Schiller-Naumann e a equação de Stokes, mostrou-se adequado, especialmente para números de Reynolds inferiores a 0,35. Concluíram que um ângulo de contato maior aumenta a eficiência de separação e reduz o diâmetro de corte nas mesmas condições operacionais.

Daza *et al*. (2020) estudaram, além do efeito da pressão na entrada, a influência da distribuição do tamanho das partículas de alimentação no *roping* em hidrociclone de 75 mm, operando com vazão variável e alimentado com dois materiais diferentes. O escoamento multifásico é modelado adotando a abordagem Euleriano, considerando todas as fases como um contínuo. As fases sólidas são descritas pela teoria cinética dos fluxos granulares (KTGF). A turbulência associada é modelada com o modelo de tensões de Reynolds (RSM) e o efeito da parede é tratado como uma função de parede padrão. Os autores propuseram que a geometria do hidrciclone (razão Du/Do de 0,6) fosse capaz de gerar *roping* e condições de spray, validando os resultados numéricos com dados experimentais. Concluíram que a distribuição do tamanho das partículas do material na alimentação tem um impacto direto no comportamento do *underflow*; ao operar com material mais grosso, o dispositivo tende a formar roping à medida que o ângulo de spray diminui. O mesmo acontece com o aumento da pressão de alimentação, ou seja, gera *roping*. A condição de roping gerada pelo material grosso afeta diretamente a eficiência do hidrociclone, provocando um aumento no tamanho de separação. A distribuição do tamanho das partículas no *underflow* tende a ser mais grossa com o aumento da pressão de alimentação. Por outro lado, a redução da pressão de alimentação tende a resultar em partículas menores no overflow.

A recuperação de minerais valiosos com granulometria abaixo de 100 μm é um desafio no processamento mineral, inviabilizando a recuperação por métodos

convencionais de separação gravimétrica. Diversos equipamentos e métodos de separação foram desenvolvidos nas últimas décadas para possibilitar a recuperação dessas frações finas, especialmente em minas de cromita, onde o método convencional não é eficiente. Exemplos de tecnologias emergentes capazes de separar eficientemente espécies minerais até o limite granulométrico de 20 µm incluem espirais para concentração de finos e concentradores centrífugos, como o separador de múltiplas gravidades (MGS). Além disso, estudos recentes têm adotado dispositivos ciclônicos com membranas para partículas menores que 10 µm (ÇIÇEK E CÖCEN, 2002; RICHARDS *et al*., 2000; SOUZA *et al*., 2019; TARORE *et al.*, 1995).

Na indústria de mineração, técnicas de modelagem matemática e simulação são fundamentais para dimensionar equipamentos de processo, especialmente durante a otimização das operações de britagem e moagem. O desempenho dos hidrociclones é influenciado por suas dimensões, variáveis operacionais e propriedades físicas dos sólidos e da polpa alimentada (Cabral *et al*., 2020; Adão *et al*., 2010). Devido à complexidade dos fenômenos associados, a representação precisa do desempenho dos equipamentos e processos depende de diversos fatores, como a qualidade das calibrações realizadas, que, por sua vez, dependem de dados representativos da operação modelada, tornando necessário ajustes nos modelos.

Braga *et al*. (2019) analisaram barragens construídas com rejeitos gerados pelas usinas de beneficiamento, avaliando o destino do material ciclonado utilizando hidrociclones. A fração mais grossa do underflow foi utilizada na construção da barragem, enquanto a fração mais fina foi lançada no reservatório. Eles observaram um aumento na recuperação de água e no ângulo de disposição do material ciclonado. Medições topográficas indicaram que a ciclonagem aumentou o ângulo de acomodação do material em até três vezes. Concluíram que a ciclonagem pode otimizar a ocupação do reservatório devido ao ganho no ângulo de deposição do material ciclonado.

Stephens D.W. e Mohanarangam K. (2009) analisaram quatro modelos de turbulência utilizando o ANSYS-CFX 11.0, em um hidrociclone de 75 mm de diâmetro. O modelo SST-CC (Shear Stress Transport) mostrou melhores resultados, seguido pelo modelo SSG (Reynolds Stress), que requer a resolução de cinco equações adicionais. Os autores relataram que, a 60 mm do topo, os modelos k-ε e SST não conseguiram capturar a tendência de turbilhões. Já os modelos SST-CC e SSG capturaram eficazmente o fluxo de vórtice tanto na extremidade quanto no núcleo de ar. A 120 mm, o SST-CC manteve a precisão, enquanto o SSG falhou em capturar a magnitude da velocidade próxima ao núcleo de ar. A 180 mm, o SST-CC se aproximou melhor dos dados experimentais do que o SSG, mas a assimetria na estrutura de fluxo observada nos experimentos não foi reproduzida por nenhum dos modelos de turbulência analisados. As velocidades tangenciais na seção de 60 mm mostraram boa correlação para SST-CC e SSG, apesar do SSG não replicar a velocidade máxima. Na seção de 120 mm, o SSG novamente não capturou bem a magnitude máxima, enquanto o SST-CC teve melhor desempenho. Embora o SST-CC tenha mostrado boa correspondência a 180 mm, a assimetria entre as velocidades não foi claramente prevista. Os resultados mostram que os modelos k-ε e SST sem correção de curvatura têm bom desempenho, mas carecem de um termo de curvatura, essencial para fluxos turbulentos em hidrociclones. A correção surge no modelo SST-CC como um multiplicador no termo de produção e no SSG pela correlação pressão-deformação, que redistribui as tensões de Reynolds.

Diante do exposto, esse trabalho de pesquisa teve como objetivo estudar a evolução dos processos de separação partículas sólidas-fluido, utilizando hidrociclones

na indústria de mineração, tendo em vista as dificuldades de sua medida experimental, para a determinação da eficiência do equipamento, fazendo-se necessário estudos avançados e tecnologias inovadoras para atender as normas cada vez mais rígidas.

2. METODOLOGIA

A pesquisa foi desenvolvida nos Laboratórios de Fluidinâmica Computacional (LPFI-UFCG) da Unidade Acadêmica de Engenharia Química e no Laboratório Computacional de Térmica e Fluidos (LCTF-UFCG) da Unidade Acadêmica de Engenharias Mecânica do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal de Campina Grande, ambos equipados com licenças de programas comerciais e acadêmicos. As simulações foram realizadas em computadores equipados processador Intel Core I5 de 2.2 GHz; 8 GB de memória RAM; 1 TB de memória física (HD); ambiente Windows 10; sistema operacional de 64 bits.

3. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

Neste trabalho, foi realizado um estudo do processo de separação em um hidrociclone, considerando escoamento bifásico, turbulento, incompressível, em estado estacionário e isotérmico. Foi utilizado o modelo de turbulência RNG k-epsilon para avaliar a hidrodinâmica e o desempenho da separação de partículas sólidas e fluido em um hidrociclone. A simulação numérica CFD foi feita com o software Ansys Fluent® 21.0, utilizando o método de volumes finitos (FVM), o esquema de discretização QUICK, o método PRESTO para cálculo de pressão e o algoritmo SIMPLE para acoplamento pressão-velocidade, focando na indústria de mineração.

3.1. GEOMETRIA E MALHA

Na análise da CFD, é preciso criar e definir a geometria do domínio de estudo, que depois será transformada em um domínio computacional, onde as equações matemáticas da análise serão aplicadas e resolvidas.

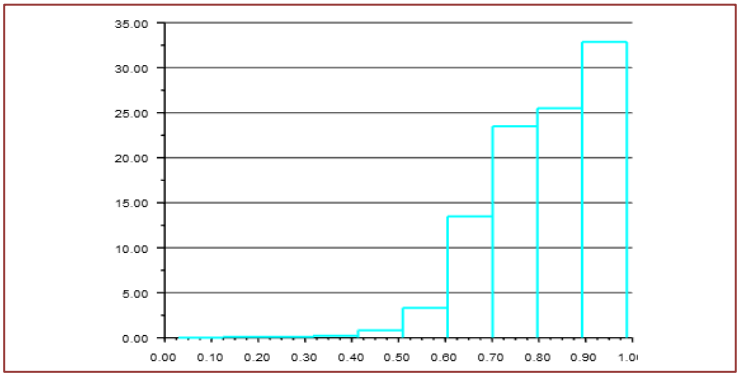
O modelo computacional apresentado é baseado em uma geometria 3D. O hidrociclone estudado na pesquisa, Figura 1, possui uma entrada de seção retangular e o corpo é composto por seções cilíndrica e cônica, com duas saídas circulares (*overflow* e *underflow*).

Figura 1 – Geometria do hidrociclone

Fonte: Autora, (2024)

Foi utilizada uma malha não estruturada com elementos tetraédricos, com 121.894 nós, qualidade ortogonal mínima de 0,02953475 e está dentro da razão de aspecto máxima 38, 511342, como mostra a Figura 2.

Figura 2 - Qualidade ortogonal.



Fonte: Autora (2024).

4. PROPRIEDADES DOS MATERIAIS E FLUIDOS

As partículas sólidas foram caracterizadas como partículas de vidro em formato esférico, cuja propriedades estão na Tabela 1. Enquanto na Tabelas 2, encontram-se as

propriedades dos fluidos ar e água (densidade (ρ), Calor específico (C_p), Condutividade Térmica (K).

Tabela 1 - Propriedades esfera de vidro.

Propriedades	Valor (s)
ρ (kg/m^3)	2700
C_p (J/kg K)	669.888

Fonte: Incropera (2011)

Tabela 2 - Propriedades dos Fluidos

Propriedades	Ar	Água
ρ (kg/m3)	1225	998,2
Cp (J/kg K)	1006.43	4182,0
K (W/m.K)	0.0242	0,6

O fator de relaxação foi usado para acelerar a convergência do método, variando entre zero e um, conforme Tabela 3. O valor ótimo do fator de relaxação é aquele que minimiza o número de iterações necessárias para a convergência.

Tabela 3 - Fator de relaxação.

Variável	Fator de relaxação
Pressão	0,3
Densidade	1,0
Forças de corpo	1,0
Momento	0,7
Energia Cinética Turbulenta	0,8
Taxa de dissipação turbulenta	0,8
Viscosidade turbulenta	1,0
Fonte da fase discreta	0,5

Fonte: Ansys Fluent 21.0

5. MODELAGEM MATEMÁTICA

Ansys Fluent prevê a trajetória da partícula na fase discreta, integrando o equilíbrio de forças sobre a partícula, que é escrito em um referencial Lagrangiano. Esse equilíbrio de forças iguala a inércia da partícula às forças que atuam sobre ela e pode ser escrita pela Equação 1.

$$m_p \frac{d\vec{u}_p}{dt} = m_p \frac{\vec{u} - \vec{u}_p}{\tau_r} + m_p \frac{(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + \vec{F} \quad (1)$$

onde m_p é a massa da partícula, u e u_p são as velocidades da fase fluida e da partícula respectivamente, e, ρ e ρ_p são as densidades do fluido e da partícula,

respectivamente. O termo $m_p \frac{\vec{u}-\vec{u}_p}{\tau_r}$ é a força de arraste, τ_r é o tempo de relaxação da partícula (Manual do Ansys Fluent, 2021R) dada pela Equação 2:

$$\tau_r = \frac{\rho_p d_p^2}{18\mu} \frac{24}{C_d \mathrm{Re}} \tag{2}$$

onde μ é a viscosidade do fluido, d_p o diâmetro da partícula e Re é o número de Reynolds definido pela Equação 3:

$$Re = \frac{\rho d_p |\vec{u}_p - \vec{u}|}{\mu} \tag{3}$$

A rotação das partículas pode ter uma influência significativa na trajetória de uma partícula movendo-se em um fluido, especialmente em partículas maiores com altos momentos de inércia. Conduzindo a erros em comparação com o movimento da partícula real. Para explicar a rotação das partículas, uma equação diferencial ordinária adicional (EDO) para o momento angular da partícula é resolvida pela Equação 4.

$$I_p \frac{d\vec{\omega}_p}{dt} = \frac{\rho_f}{2} \left(\frac{d_p}{2}\right)^5 C_\omega |\vec{\Omega}| \cdot \vec{\Omega} = \vec{T} \tag{4}$$

onde I_p é o momento de inércia, ω_p é a velocidade angular da partícula, ρ é a densidade do fluido, d_p é o diâmetro da partícula, C_ω é o coeficiente de arrasto rotacional, T é o torque aplicado a uma partícula em um domínio de fluido, e Ω é a velocidade angular relativa partícula-fluido calculada pela Equação 5.

$$\vec{\Omega} = \frac{1}{2} \nabla \times \vec{u}_f - \vec{\omega}_p \tag{5}$$

E para uma partícula esférica, o momento de inércia é calculado pela Equação 6.

$$I_p = \frac{\pi}{60} \rho_p d_p^5 \tag{6}$$

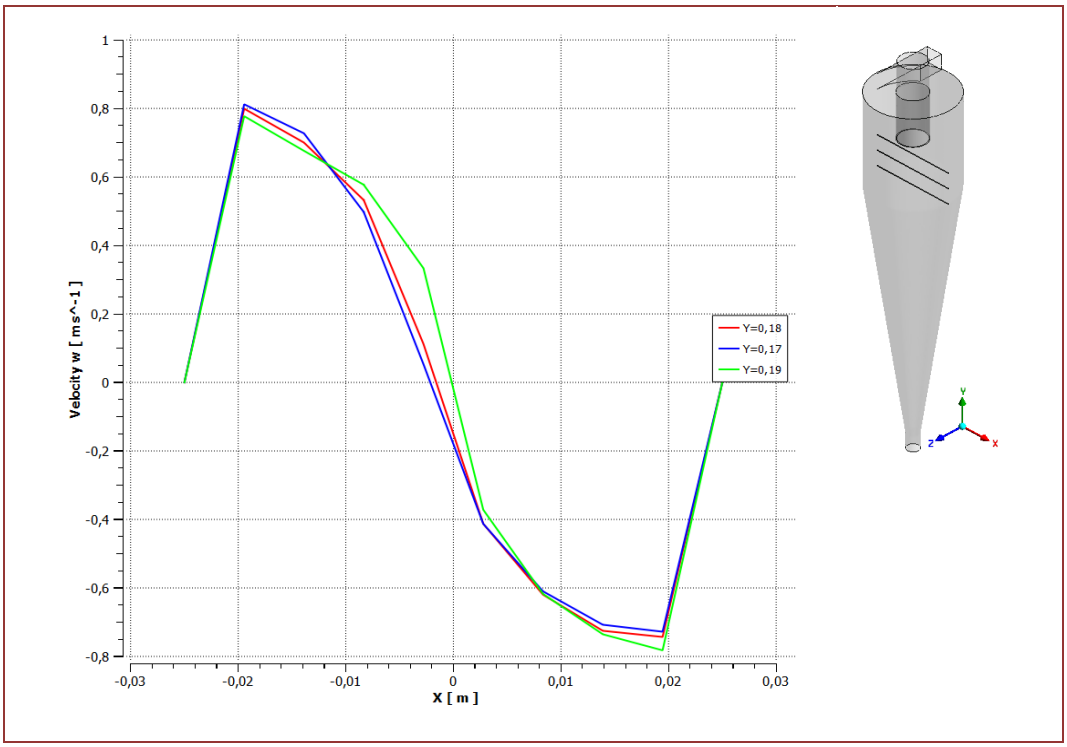
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os principais resultados da simulação numérica, da separação partícula-fluido no interior do hidrociclone, serão apresentados nesta seção.

6.1. PERFIS DE VELOCIDADES TANGENCIAL E AXIAL

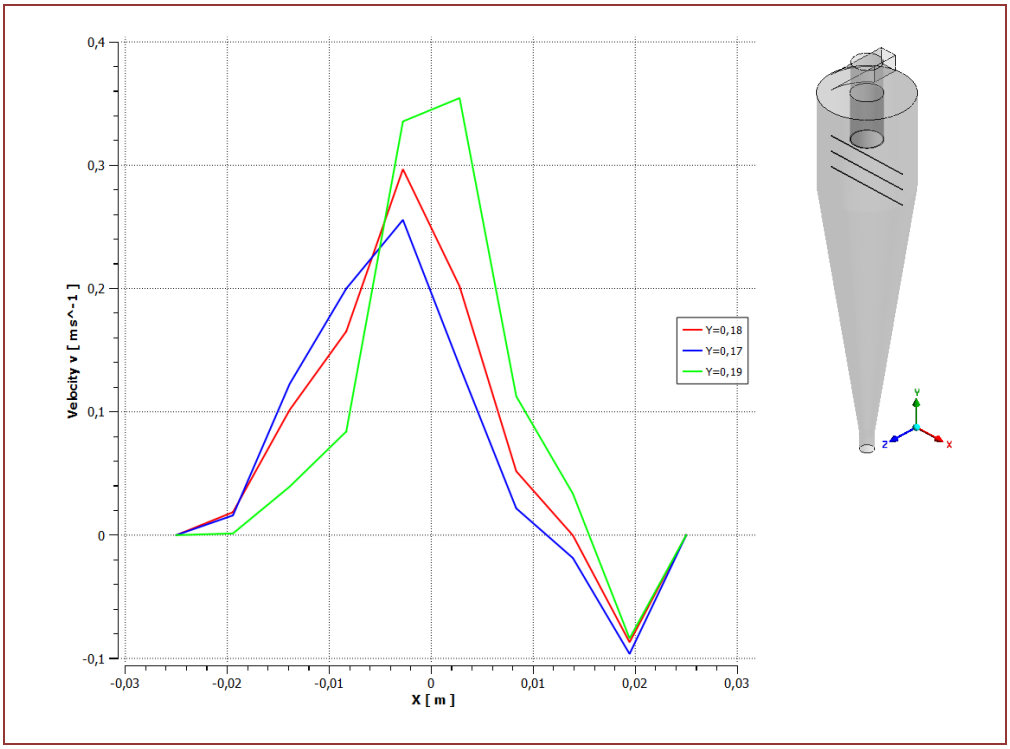
Nas Figuras 3 e 4 estão representados os perfis de velocidades tangencial e axial, respectivamente, da mistura (partículas de vidro-ar) na entrada do hidrociclone, onde a velocidade é função da coordenada x do hidrociclone para alturas y=0,17, 0,18 e 0,19 respectivamente. Ao observar as figuras verifica-se um deslocamento da curva em direção à parede do hidrociclone, representando um aumento considerável da velocidade tangencial em consideração do aumento das forças centrifugas induzidas pelo aumento da velocidade na região de entrada do equipamento levando a um aumento do momento angular e consequente intensidade turbilhonar. Verifica-se um comportamento parabólico semelhante a escoamento em tubos, observado por Farias Neto et al (1997).

Figura 3 - Perfil de velocidade tangencial.



Fonte: Autora, (2024).

Figura 4 – Perfil de velocidade axial

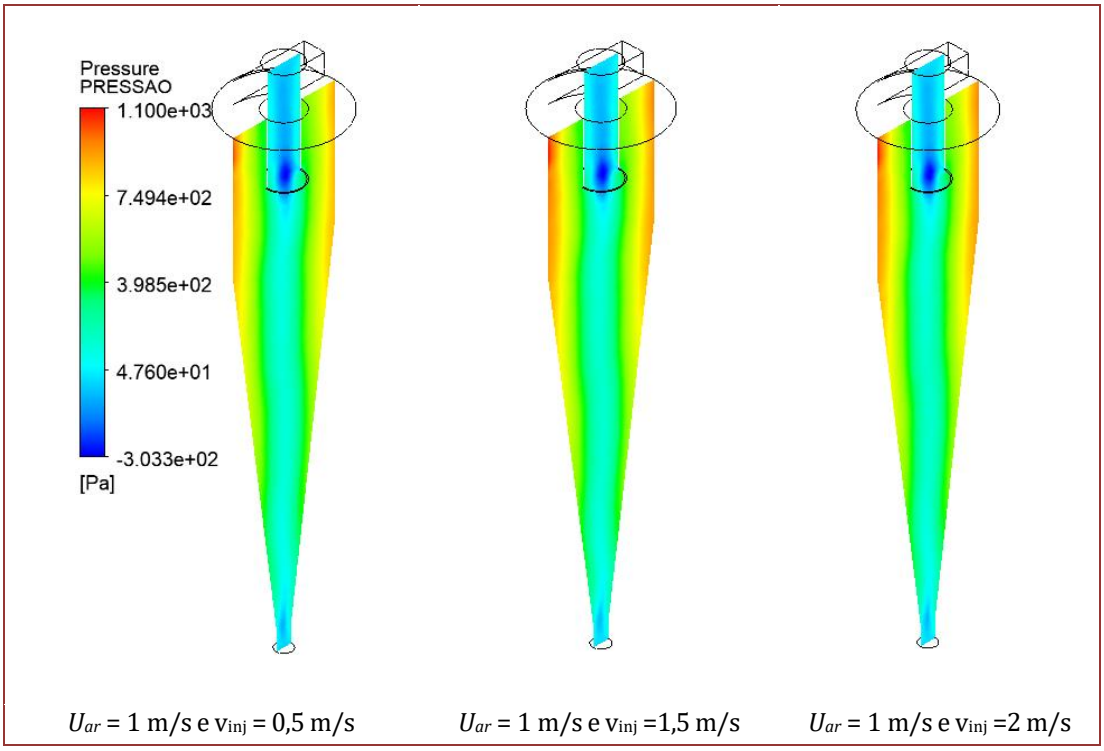


Fonte: Autora, (2024).

6.2. CAMPO DE PRESSÃO

Na Figura 5 estão representados os campos de pressões para diferentes valores de velocidade de injeção de partículas (v_{inj}) de 0,5, 1,5 e 2,0 m/s na entrada do hidrociclone, mantendo a velocidade do ar (U_{ar}) igual 1 m/s em todos os casos. É possível perceber que a região de menor pressão está distribuída axialmente ao longo do hidrociclone. Nota-se uma queda de pressão na direção radial e maiores gradientes de pressão próximas às paredes. A menor pressão encontra-se no overflow, saída superior do hidrociclone. Isso se deve ao fato de que partículas maiores e mais densas são direcionadas para as paredes, enquanto as menores são direcionadas para o *overflow*. Verifica-se também uma região de baixa pressão próxima ao eixo central do hidrociclone e regiões de maior pressão perto das paredes e da entrada tangencial.

Figura 5 - Campo de pressão para diferentes velocidades de injeção de partículas e velocidade do ar U_{ar} =1m/s.



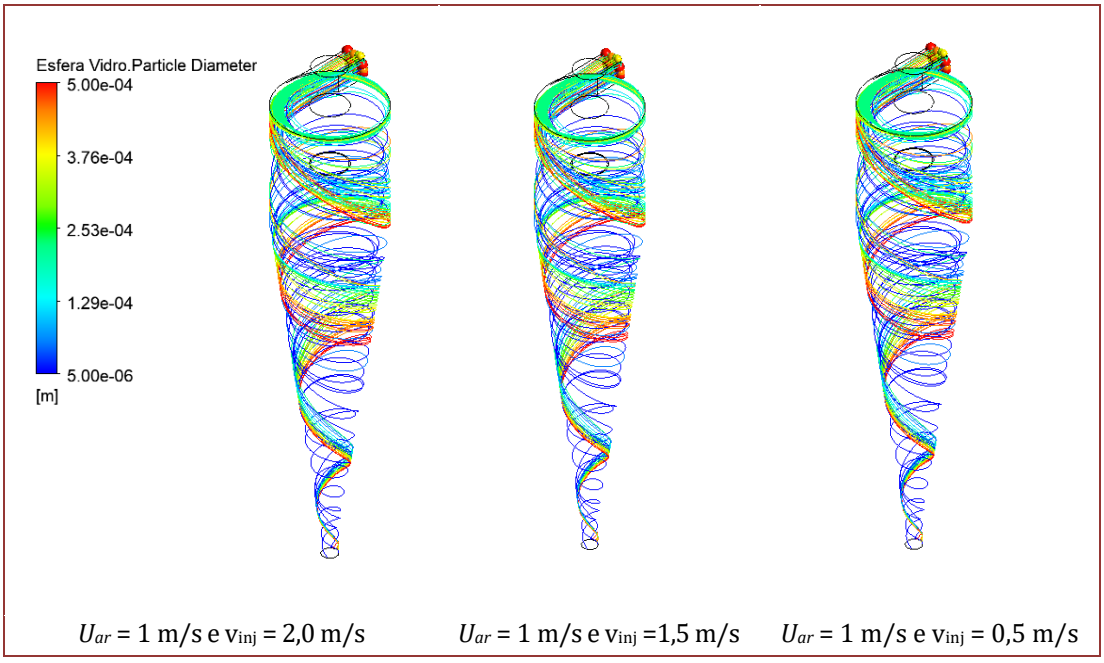
U_{ar} = 1 m/s e v_{inj} = 0,5 m/s U_{ar} = 1 m/s e v_{inj} =1,5 m/s U_{ar} = 1 m/s e v_{inj} =2 m/s

Fonte: Autora, (2024)

6.3. LINHAS DE FLUXO - EFEITO DA VELOCIDADE DE INJEÇÃO

A Figura 6 ilustra os comportamentos das linhas de fluxo no hidrociclone para diferentes valores de velocidade de injeção de partículas (v_{inj}) de 0,5, 1,5 e 2,0 m/s na entrada do hidrociclone, mantendo a velocidade do ar (U_{ar}) igual 1 m/s e levando em consideração uma distribuição de diâmetro de partículas entre $5x10^{-6}$ e $5x10^{-4}$ m. É possível observar o comportamento das esferas de vidro no interior do hidrociclone, quanto a dimensão do diâmetro. É possível observar que as partículas maiores saem pela saída inferior *underflow*, traduzindo-se numa redução do número de voltas das linhas de fluxo, o que pode ser explicado pela intensidade das forças atuando nas partículas, em especial, as forças de arraste, centrífuga e peso, quando comparadas com as partículas de menor diâmetro que são arrastadas para a saída superior *overflow* e ainda outras menores permanecendo no interior do hidrociclone. Segundo Farias Neto (1997) citado em Souza et al. (2015), quando o momento angular é predominante há redução do momento circular das linhas de fluxo, predominando a força peso. A Figura 7, que mostra os comportamentos das linhas de fluxo no hidrociclone para diferentes valores de velocidade de injeção de partículas (v_{inj}) de 0,5, 1,5 e 2,0 m/s na entrada do hidrociclone e a velocidade do ar (U_{ar}) igual 1 m/s, evidencia de maneira clara que o escoamento em um hidrociclone apresenta um comportamento dinâmico complexo, apresentando recirculações ao longo do equipamento.

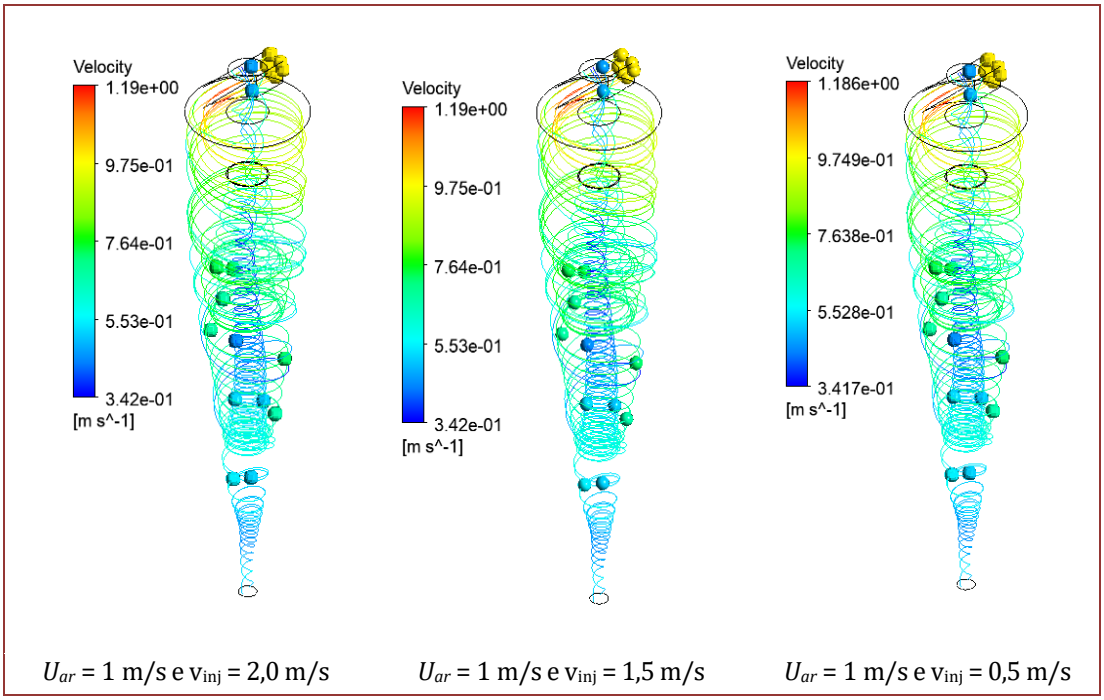
Figura 6 - Diâmetro das partículas para diferentes velocidades de injeção de partículas e velocidade do ar U_{ar} =1m/s.



U_{ar} = 1 m/s e v_{inj} = 2,0 m/s U_{ar} = 1 m/s e v_{inj} =1,5 m/s U_{ar} = 1 m/s e v_{inj} = 0,5 m/s

Fonte: Autora, (2024)

Figura 7 – Linhas de corrente para diferentes velocidades de injeção de partículas e velocidade do ar U_{ar} =1m/s.



U_{ar} = 1 m/s e v_{inj} = 2,0 m/s U_{ar} = 1 m/s e v_{inj} = 1,5 m/s U_{ar} = 1 m/s e v_{inj} = 0,5 m/s

Fonte: Autora, (2024)

7. CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos foi possível concluir que:

- A fluidodinâmica do processo de separação partículas sólidas-fluido, possibilitando a compreensão do comportamento complexo tridimensional do escoamento no interior do hidrociclone;
- Foi possível construção dos campos de pressão, o efeito do diâmetro das partículas e das linhas de corrente;
- Diante dos resultados obtidos foi possível quantificar a eficiências do equipamento, obtendo uma eficiência de 99,5%
- A velocidade de entrada do ar Uar e a velocidade de injeção das partículas não influenciaram significativamente na eficiência de separação para os casos estudados.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro da Fundação de Apoio à Pesquisa do Estado da Paraíba a FAPESQPB Edital nº 09/2023 BDL-PDRP/Pós-Doutorado no país. Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos PPGEP da Universidade Federal de Campina Grande Edital PRPG nº 56/2023.

REFERÊNCIAS

[1] ADÃO B. L., JOÃO A. S., SILVIA C. A. F. Tratamento de Minérios – 5ª Edição/Ed. - Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. 965 p.

[2] CABRAL, E. M., SOUZA, J. S., MAGALHÃES, H. L. F., PORTO, T. R. N., SILVA, C. J., GOMEZ, R. S., LIMA, W. M. P. B., LIMA, E. S., LIMA, A. G. B. Análise do processo de separação óleo-água em hidrociclones via CFD. Research, Society and Development, v. 9, p. e90991110610, 2020.

[3] ÇIÇEK, T;. e CÖCEN, I. Applicability of Mozley multigravity separator (MGS) to fine chromite tailings of Turkish chromite concentrating plants. Minerals Engineering, 2002. 15, p. 91-93.

[4] FARIAS NETO, S. R., Simulation numérique des ecoulements annulaires non-etablis de types axial et tourbilionnaire – cas du transfert de matiére, tese de doutorado. Universidade de Nantes, Saint-Nazire, França 1997.

[5] FARIAS, F.P.M., SOUZA J.S., LIMA, W.C.P.B., MACÊDO, A.C., FARIAS NETO, S.R. AND LIMA, A.G.B. Influence of Geometric Parameters of the Hydrocyclone and Sand Concentration on the Water/Sand/Heavy-Oil Separation Process: Modeling and Simulation. The International Journal of Multiphysics, 5(3), 187-202, 2011. https://doi.org/10.1260/1750-9548.5.3.187

[6] RICHARDS, R. G.; MACHUNTER, D.M.; GATES, P. J. e PALMER, K.. Gravity separation of ultrafine (-0,1 mm) minerals using spiral saparators. Minerals Engineering, 2000.v. 13, no 1, p. 65-77.

[7] SOUZA, J. S., FARIAS NETO, S. R., LIMA, A. G. B. Separação de Líquidos via Hidrociclone:Termofluidodinâmica. 1. ed. Germany: NEA-Novas Edições Acadêmicas, 2015. v. 1. 156p ISBN-10, 3639699467. ISBN-13, 978-3639699463.

[8] SOUZA, J. S; FARIAS NETO, S. R.; LIMA, A. G. B. ; FARIAS, F. P. M. Análise da Camada Limite em Dispositivo Ciclônico usando CFX. 19. ed. Novas Edições Acadêmicas, 2019. 128p. ISBN-13: 978-3-639-61642-2, ISBN-10:3639616421.

[9] STEPHENS D.W. e MOHANARANGAM K. Turbulence model analysis of flow inside a hydrocyclone. Seventh International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries, 2009. Melborne, Australia.

[10] SVAROVSKY, L. Solid-Liquid Separation. 2. ed. Londres: Butterworths, 1981. (Butterworths Monographs in Chemistry and Chemical Engineerings). 10

[11] TARORE, T.; CONIL, P.; HOUOT, R.; SAVA, M. An evaluation of the Mozley MGS for fine particle gravity separation. Minerals Engineering, 1995. vol. 8, no 7, p. 767-778.

[12] VALADÃO, G.E.S.; ARAUJO, A.C. Introdução ao tratamento de minérios. Belo Horizonte: Ed. UFMG, 2007. 234 p.

[13] WANG RUI, ZIANG ZHANG, XIAOKANG YAN, HAIJUN ZHANG, LIJUN WANG, Hydrocyclone separation enhancement of fine particles based on interface control, Minerals Engineering, volume 209, 2024, 108628, ISSN 0892-6875, ttps://doi.org/10.1016/j.mineng.2024.108628.

Capítulo 12

Estudo da cinética da transformação martensita-austenita em ligas com memória de forma de altas temperaturas Ni-Ti-Hf obtidas por melt-spinning

Glauco Ruben de Freitas Brito[1]
Roniere Leite Soares[2]
Júlio Feitosa da Silva Neto[3]
Carlos José de Araújo[4]
Antônio Gilson Barbosa de Lima[5]

Resumo: As ligas com memória de forma são um importante grupo de materiais ativos, que têm levantado interesse em decorrência de sua vasta gama de aplicações tecnológicas em diversos campos, da indústria aeronáutica até aplicações de saúde. Este interesse se dá por base na capacidade desses materiais de recobrarem sua forma por meio do efeito de memória de forma (EMF) e da superelasticidade (SE). Ambos os fenômenos permitem recuperações dimensionais consideráveis. O grupo mais estudado destas ligas é o de base Ni-Ti. Estas ligas, possuem ampla resistência à oxidação. Porém, encontram sua aplicabilidade limitada à temperatura ambiente. Neste contexto, surgiu nas últimas décadas a necessidade da investigação de ligas de memória de forma de altas temperaturas, sendo as ligas Ni-Ti-Hf integrante deste grupo. Neste trabalho, a transformação martentisa-austenita nestas ligas, obtidas pelo método melt-spinning é estudado. As equações do modelo de Johson-Mehl-Avrami-Komogorov (JMAK) foram utilizadas para modelar a transformação martensita - austenita, apresentando resultados compatíveis com a realidade física do fenômeno. Ensaios em DSC foram realizados utilizando-se cinco diferentes taxas de aquecimento. Observou-se que as taxas de aquecimento ajustam as entalpias de transformação. O método de Arrhenius foi utilizado para calcular as energias de ativação, e concluiu-se através de sua utilização que as energias de ativação diminuem com a elevação das taxas de aquecimento. Portanto, este estudo fornece uma referência do comportamento térmico para futuros projetos envolvendo ligas com memória de forma de altas temperaturas Ni-Ti-Hf.

Palavras - Chave: Ligas com Memória de Forma, Transformação Cinética, Calorimetria Exploratória Diferencial.

[1] Discente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos - CCT – UFCG
[2] Docente da Unidade Acadêmica de Engenharia de Produção – CCT - UFCG
[3] Discente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica - CCT – UFCG
[4] Docente/pesquisador da Unidade Acadêmica Engenharia Mecânica – CCT – UFCG
[5] Docente/pesquisador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos – CCT – UFCG

1. INTRODUÇÃO

As ligas com memória de forma vêm sendo objeto de interesse em pesquisas cientificas nas últimas décadas. Este, importante, grupo de materiais inteligentes, possui a capacidade de recobrar a forma inicial através do Efeito de Memória de Forma (EMF) quando esta forma inicial é recobrada através da aplicação de um ciclo térmico adequado, ou a superelasticidade (SE) quando há a recuperação de tensões induzidas por carregamento mecânico, à medida que, este carregamento mecânico é retirado (FANG.et al 2017) .

Por esta capacidade de recuperação de forma, estes materiais tem sido, frequentemente, estudados para aplicações industriais, com espectro amplo de utilização, da indústria aeronáutica, passando pela construção civil, até mesmo, às aplicações em saúde (DZOGBEWU & DE BEER, 2024). As ligas Ni-Ti, base mais estudada destas ligas, possuem aplicações construtivas em elementos necessários às cirurgias ortopédicas, por exemplo, em aparelhos ortodônticos (POITOUT, 2016). O princípio de sua funcionalidade a estas demandas consiste de sua elevada resistência à oxidação. Todavia, uma limitação à utilização destas ligas consiste de sua restritiva aplicação às condições na temperatura ambiente, temperatura de transformação (Af < 30º). Neste contexto, com a evolução dos estudos, começou-se a investigar o efeito da adição de um terceiro elemento ao binário inicial Ni-Ti, com a finalidade de se obter através disto, temperaturas de transformação mais elevadas.

Ligas com Memória de forma com temperaturas de transformação mais elevadas pertencem a um subgrupo específico de LMF, as ligas com memória de forma de altas temperaturas *HTSMAS,* do inglês (High Temperature Shape Memory Alloys). Este sub grupo, engloba as LMF que possuem capacidade de realizarem transformação de fase Martensita-Austenita em temperaturas superiores (Af >100ºC) e detêm, portanto, a capacidade de serem utilizadas em solicitações em temperaturas elevadas (JIANG et al. 2024).

A alocação de um terceiro elemento ao binário inicial Ni-Ti, pode adicionar característica de altas temperaturas à liga primária, devido a este terceiro elemento alocado ser detentor de uma temperatura mais elevada de ponto de fusão (Tf > 1000 ºC). No que se relaciona às ligas concebidas por base no sistema NiTinol, uma outra característica que pode conceber temperaturas de transformação mais elevadas, consiste do raio atômico do terceiro elemento ser mais elevado que o do Niquel e do Titânio (MENG et al. 2001). No caso das ligas Ni-Ti-Hf, em particular, tem-se o raio atômico do Hf que é de 0,155nm e a temperatura média do ponto de fusão Tm= 2232,85ºC, grandezas físicas, consideravelmente, maiores que as do Ni, que possui raio atômico igual a 0,124 nm e Tm=1454,85 ºC e o Titânio, que possui raio atômico de 0,140 nm e Tm= 1667,85 ºC (SOARES, 2019).

Um aspecto físico testado neste estudo, refere-se à termoatividade destas ligas, onde, através da variação das taxas de aquecimento na realização dos ensaios de DSC, do inglês (Differential Scanning Calorimetry), haverá a tentativa de se observar uma correlação entre a proporcionalidade do incremento nessas taxas de aquecimento, com algumas grandezas físicas, como as entalpias e energias de ativação, denotando o comportamento responsivo destas ligas às variações de condições experimentais térmicas (termoatividade) (BRITO et al. 2024).

No presente estudo, dois modelos cinéticos serão empregados para descrever o processo de transformação de fase martensita – austenita, base do Efeito de Memória de

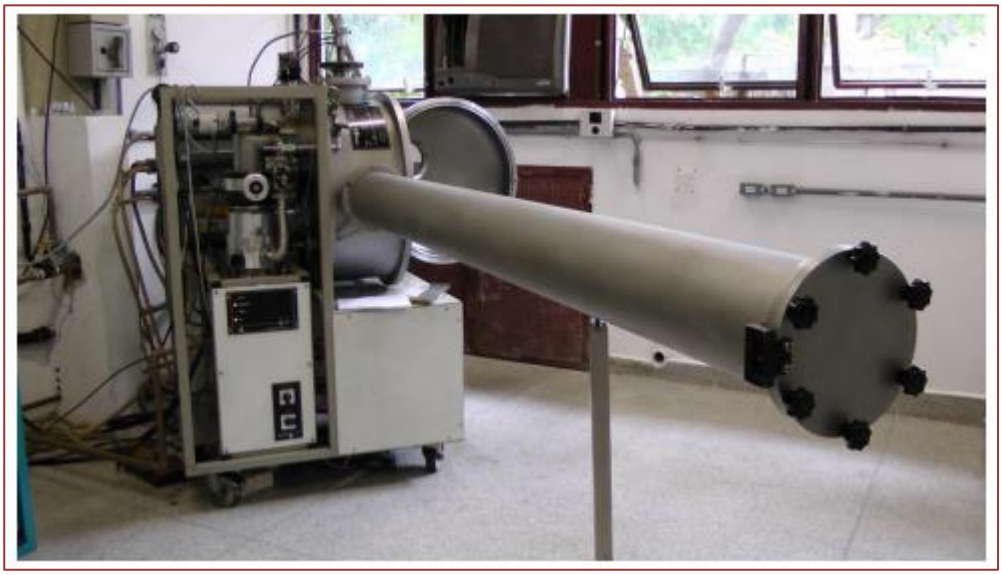
Forma. Com a finalidade de se observar a precisão da relação entre os resultados modelados e as medidas experimentais, bem como para traduzir as características do processo de transformação através de seus expoentes, será utilizado o modelo de Avrami (JMAK) (YI et al. 2022). O modelo de Arrhenius será utilizado para correlacionar as respostas das energias de ativação ao estimulo térmico das variadas taxas de aquecimento.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Este estudo foi realizado utilizando-se duas composições com a base $Ni_{50}Ti_{50-x}Hf_x$, com X=14 e x=20, a fim de se observar, também, o comportamento térmico destas ligas, em decorrência de uma variação considerável em termos de composição, do elemento ternário Hf.

O método de solidificação utilizado para a obtenção das fitas concebidas por base nas ligas Ni-Ti-Hf utilizado neste trabalho foi o Melt-Spinning. Este método de obtenção foi utilizado fomentando a solidificação rápida das ligas em não equilíbrio termodinâmico, através de uma rápida têmpera que se deu a partir do momento em que há o contato entre a liga fundida e uma roda de cobre (volante) girando a velocidades, que aqui, variaram entre 18,8 m/s e 25,13 m/s. A ejeção das ligas deu-se a temperatura de, aproximadamente, 1350 ºC a uma pressão de 20000 Pa. A distância da ponta de ejeção do cadinho para o volante foi de 0,5 mm e o ângulo entre o cadinho e o valor normal à roda foi de 5º. O equipamento de solidificação rápida utilizado para obtenção das fitas por base nas ligas Ni-Ti-Hf é ilustrado na Figura 1.

Figura 27 - Equipamento de solidificação rápida Melt-Spinning da UFSCar. Foi utilizado neste trabalho para a obtenção das fitas.



Fonte: SOARES, 2019

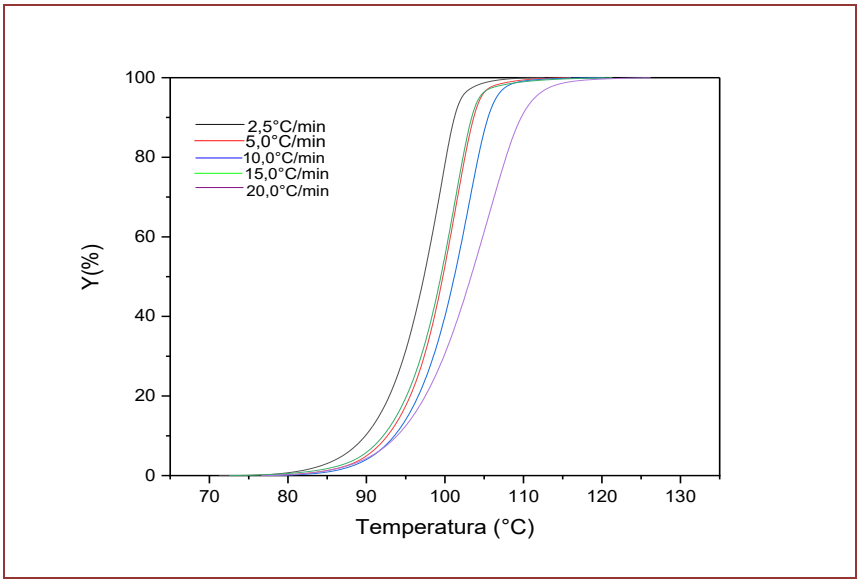
Ao chocar-se com o volante, que atua como substrato, o jato de metal liquido cria uma bolsa. Essa bolsa, que é gerada pela projeção continua de metal liquida, serve de reservatório por onde emerge uma fita de metal que após ser solidificada rapidamente é lançada fora do volante através da centrifuga.

Para a realização da parte cinética do estudo e, consequente, investigação das correlações entre a variação das condições experimentais e as respostas das grandezas cinéticas das ligas Ni-Ti-Hf, as caracterizações de DSC foram realizadas utilizando-se quatro taxas de aquecimento distintas: 2,5 ºC/min; 5,0 ºC/min; 10,0 ºC/min; 15,0 ºC/min; 20,0 ºC/min.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

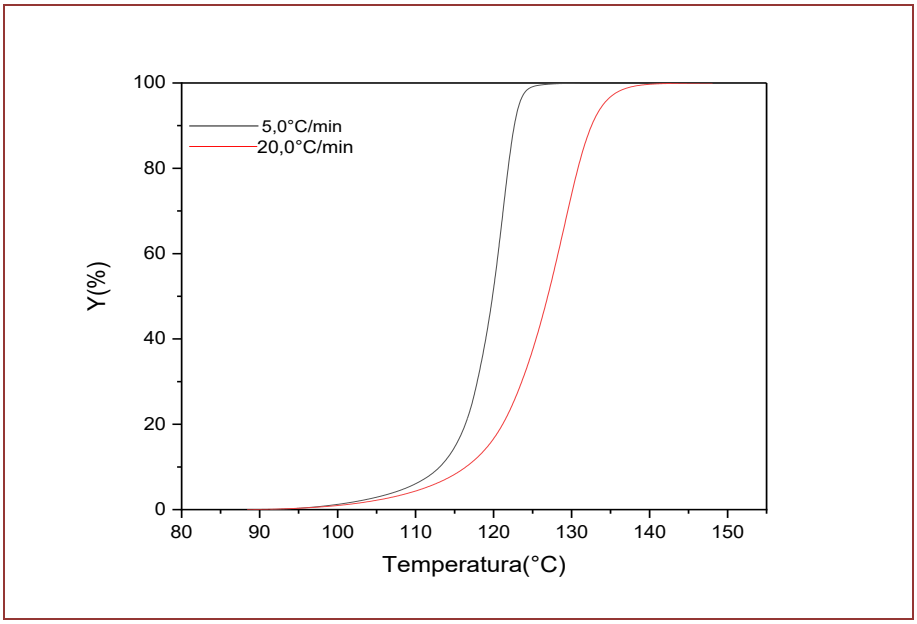
Tendo em vista as caracterizações térmicas realizadas por DSC, observou-se um aumento das temperaturas (Ai) e (Af), à medida que, houve o incremento na quantidade do elemento Hf na composição das ligas, denotando, que sua adição à base inicial Ni-Ti, de fato, tem a capacidade de adicionar a característica de altas temperaturas a estas ligas com memória de forma (JIANG et al. 2024). Este aumento fica claro, à medida que se observa as Figuras 2, 3 onde se tem as curvas descritivas dos ensaios DSC, e ainda mais elucidativo, na Tabela 1, onde se apresentam os valores das temperaturas de transformação (Ai) e (Af) para as amostras de fitas concebidas por base na liga Ni-Ti-Hf.

Figura 28- Gráfico de forma sigmoide da fração transformada versus temperatura, comparando o comportamento das transformações na liga Ni50Ti36Hf14, obtida pelo processo de solidificação rápida Melt-Spinning.



Fonte – Autoria própria.

Figura 29 - Gráfico comparativo dos ensaios (DSC) para a liga de composição Ni50Ti30Hf20 (Melt-Spinning), tomando como parâmetro as diferentes taxas de aquecimento.



Fonte – Autoria própria

É possível observar tanto das Figuras 2 e 3, como da Tabela 1, que as temperaturas de transformação (Ai) e (Af), também, são acrescidas à medida que as taxas de aquecimento aumentam, o que denota o caráter responsivo destas ligas ao estimulo térmico das variadas taxas de aquecimento (termoatividade) (BRITO et al. 2024) A composição Ni50Ti30Hf20 apresentou para as taxas de aquecimento 5,0 ºC/min; 10,0 ºC/min e 15 ºC/min, a morfologia de picos duplos com ficará bem expressa na Figura 6. Assim sendo, conforme descrito em (ZOTOV et al. 2014), a presença desses picos duplos requer a admissão de hipóteses adicionais para a forma de picos duplos correspondentes no DSC. As adições de tais hipóteses podem afetar, de forma importante, a precisão das análises cinéticas. Portanto, realizou-se o estudo cinético apenas, nas ligas que não apresentam, tão claramente, tais degraus duplos de transformação de fase.

Tabela 24 - Temperaturas de transformação nas ligas NiTiHf obtidas pelo processo de solidificação rápida Melt Spinning.

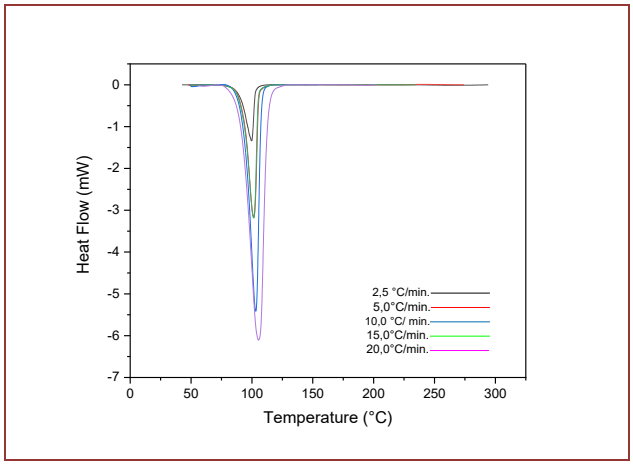
Composição	Taxa de aquecimento (°C/min.)	Ai (°C)	Af (ºC)
$Ni_{50}Ti_{36}Hf_{14}$	2,5	85,89	102,68
$Ni_{50}Ti_{36}Hf_{14}$	5,0	92,41	105,21
$Ni_{50}Ti_{36}Hf_{14}$	10,0	90,10	108,04
$Ni_{50}Ti_{36}Hf_{14}$	15,0	90,21	104,58
$Ni_{50}Ti_{36}Hf_{14}$	20,0	89,16	113,36
$Ni_{50}Ti_{30}Hf_{20}$	2,5	114,02	128,02
$Ni_{50}Ti_{30}Hf_{20}$	5,0	113,35	124,66
$Ni_{50}Ti_{30}Hf_{20}$	10,0	109,76	128,83
$Ni_{50}Ti_{30}Hf_{20}$	15,0	112,43	133,07
$Ni_{50}Ti_{30}Hf_{20}$	20,0	113,10	135,72

Fonte – Autoria própria.

3.1. ANÁLISE DE ENTALPIAS

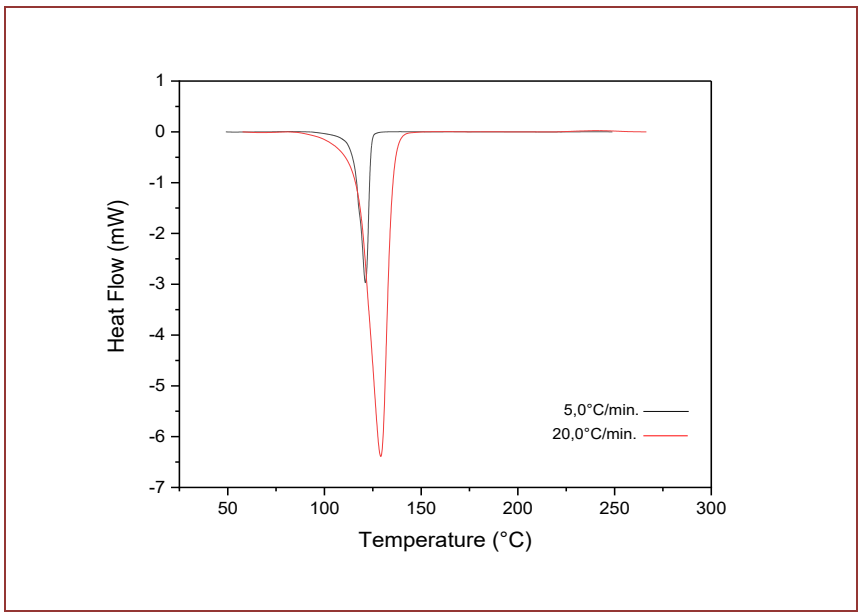
Após a realização dos ensaios de DSC conforme descrito nas Figuras 4,5 e 6, observou-se o incremento nas entalpias de transformação, proporcionalmente, ao incremento das taxas de aquecimento utilizadas nos ensaios. Tais valores foram tomados, conforme descrito na seção 3, apenas para as configurações que não apresentaram picos duplos. Na Tabela 2, encontram-se os valores das entalpias de transformação obtidas atrás das análises das curvas de DSC. Nota-se que tais entalpias, conforme descrito, aumentam, à medida que, as taxas de aquecimento são acrescidas, denotando assim, o caráter responsivo das ligas Ni-Ti-Hf e sua termoatividade (ZHOU et al. 2018).

Figura 4 - Gráfico comparativo dos ensaios DSC para a liga de comparação Ni50Ti36Hf14 (Melt- Spinning), tomando como parâmetro as diferentes taxas de aquecimento.



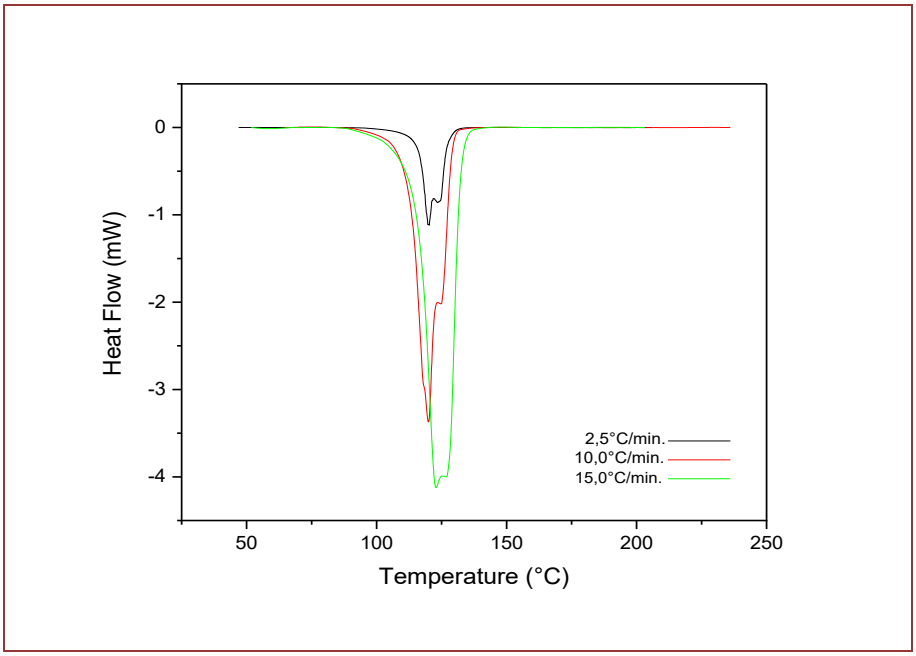
Fonte – Autoria Própria.

Figura 5 - Gráfico comparativo dos ensaios (DSC) para a liga de composição Ni50Ti30Hf20 (Melt-Spinning), tomando como parâmetro as diferentes taxas de aquecimento.



Fonte – Autoria própria.

Figura 6 - Gráfico comparativo dos ensaios DSC para a liga Ni50Ti30Hf20 (Melt-Spinning) Picos Duplos tomando como parâmetros as diferentes taxas de aquecimento.



Fonte – Autoria própria.

Tabela 25 - Entalpias de transformação obtidas a partir dos ensaios em (DSC), para as ligas concebidas através do processo de solidificação rápida Melt-Spinning.

Composição	Taxa de Aquecimento (°C/min.)	Entalpias de transformação (J/g)
$Ni_{50}Ti_{36}Hf_{14}$	2,5	11,16
$Ni_{50}Ti_{36}Hf_{14}$	5,0	14,28
$Ni_{50}Ti_{36}Hf_{14}$	10,0	14,98
$Ni_{50}Ti_{36}Hf_{14}$	15,0	13,73
$Ni_{50}Ti_{36}Hf_{14}$	20,0	15,21
$Ni_{50}Ti_{36}Hf_{20}$	Pico duplo	Pico duplo
$Ni_{50}Ti_{36}Hf_{20}$	5,0	8,63
$Ni_{50}Ti_{36}Hf_{20}$	Pico duplo	Pico duplo
$Ni_{50}Ti_{36}Hf_{20}$	Pico duplo	Pico duplo
$Ni_{50}Ti_{36}Hf_{20}$	20,0	10,02

Fonte – Autoria própria.

3.2. OBTENÇÃO DOS PARÂMETROS CINÉTICOS PELO MODELO AVRAMI ADAPTADO

O modelo de Avrami, inicialmente, foi utilizado, apenas, para a descrição de transformações isotérmicas (AVRAMI, 1939a), a primeira adaptação neste modelo para a descrição de fenômenos de natureza mais complexa foi realizada pelo próprio Avrami (AVRAMI, 1940). Com o passar das décadas, pesquisas foram desenvolvidas no sentido de

fazê-lo descrever e modelar uma gama maior de fenômenos físicos de transformação de fase, entre eles, as transformações que ocorrem em condição não isotérmica, portanto, com a presença de taxa de aquecimento (YI et al. 2022; WANG & CHEN, 2023)

Portanto, levando-se em consideração que existe um aumento da temperatura no aquecimento ao longo do tempo, tem-se a Equação 1.

$$T = T_1 \pm \Phi\tau \quad (1)$$

Se T1 se refere à temperatura no início da transformação (para τ=0) e o sinal é positivo quando a transformação ocorre com aquecimento constante e negativo quando a transformação ocorre com resfriamento constante, a taxa ϕ definida como módulo |dT/ dt|, então é sempre positivo (ZOTOV; MARZYNKEVITSCH; MITTEMEIJER, 2014). Para correlacionar os dados das frações transformadas em função do tempo, considerando a faixa de temperaturas e tempo em que tais transformações ocorrem a taxas constantes (aquecimento/ resfriamento), foi utilizado o modelo mais simples, semelhante ao primeiro modelo matemático descrito por Avrami (AVRAMI, 1939). Neste trabalho, utilizou-se a forma adaptada semelhante, conforme expresso pela Equação 2. Para tanto, utilizou-se a forma adaptada dos modelos JMAK descritos:

$$x = 1 - \exp\left(-K'\tau^{n'}\right) \quad (2)$$

Onde x é a quantidade relativa transformada e τ represente o tempo desde o início da transformação não isotérmica (ZOTOV; MARZYNKEVITSCH; MITTEMEIJER, 2014; ZHOU et al. 2018).

Chamando-se de γ, os termos do eixo das ordenadas nos gráficos, este membro esquerdo das equações de regressão linear é descrito conforme a Equação 3:

$$\gamma = \ln[-\ln(1-x)] = ln\left(ln\frac{1}{1-x}\right) \quad (3)$$

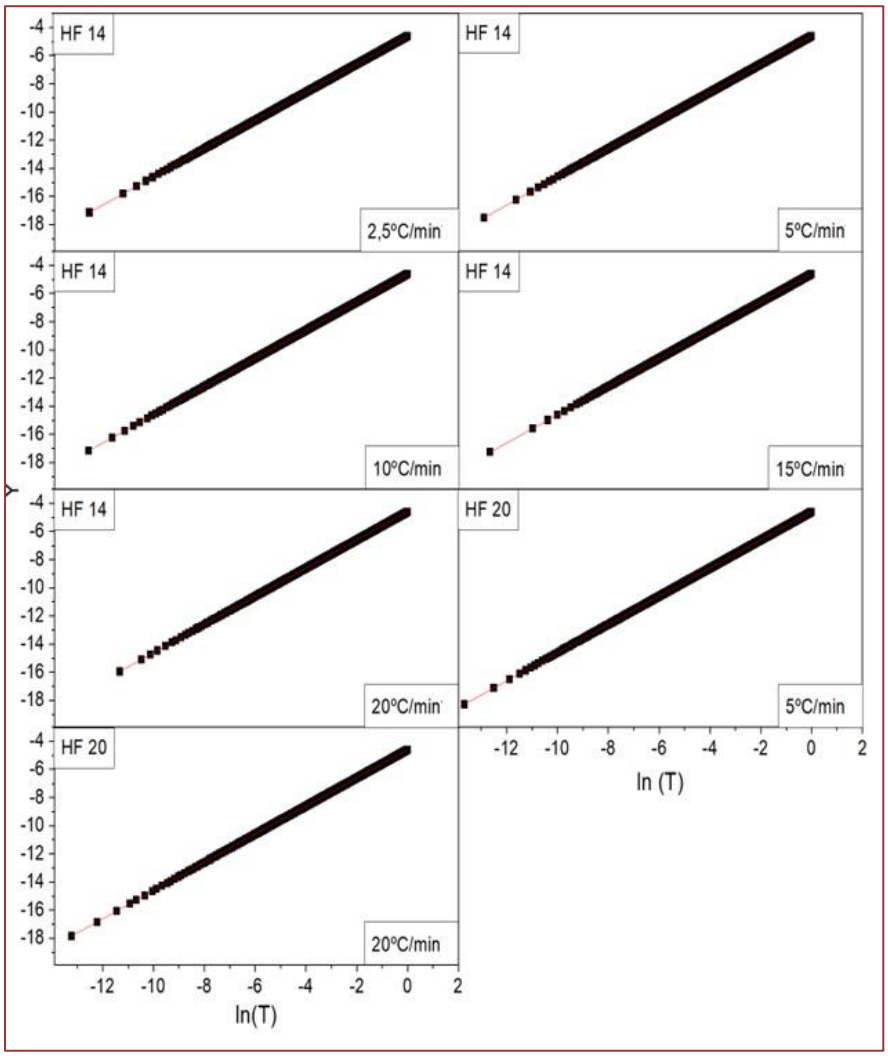
A partir da correlação entre os termos ordenados descritos por Y e os termos de abcissas substanciados por τ, foram obtidos gráficos de morfologia linear, característicos do modelo Avrami adaptado ao caso não isotérmico Figuras 7, que, assim como a Equação 2, apresentam um substancial semelhança estrutural com os gráficos expressos na teoria inicial de Avrami aplicada ao caso isotérmico (HONG et al., 2021).

Nestas condições, os parâmetros levantados através do modelo Avrami que estão contidos nas (Tabelas 3 e 4) foram obtidos realizando-se a regressão linear da reta obtida graficamente, a partir dos dados experimentais de x versus τ, através da relação estabelecida pela Equação 2.

Os resultados das (Tabelas 3 e 4) mostram um excelente ajuste na estimativa dos parâmetros do modelo. A incerteza média do Ln K' varia entre 0,00087% e 0,00130%, e a incerteza média do expoente n varia entre 0,00099% a 0,00199%. tradução do empirismo é denotada pela proporção da morfologia linear apresentada e a proporção desta em relação ao corpo total expresso pelo gráfico (BRITO et al. 2024) . Ao final do evento, os pontos não divergiram do comportamento habitual, indicando que o modelo apresenta pouquíssima discrepância. Observa-se dos resultados expostos na Tabela 3 e 4, que os expoentes de Avrami calculados, encontram-se todos em torno de 1, estando entre 1 e 1,5.

Portanto, os expoentes de Avrami indicam que o processo de cristalização dos grãos produzidos, resulta de um processo de crescimento unidimensional controlado por difusão evoluindo para crescimento controlado por difusão bidimensional e tridimensional (TIAN et al. 2018).

Figura 7 – Gráficos de Avrami obtidos a partir das fitas obtidas por melt spinning, ensaiadas nas várias taxas de aquecimento.



Fonte – Autoria própria.

Os gráficos obtidos com a utilização do modelo foram apresentados nas Figuras 7 e de acordo com a teoria, uma das medidas descritivas da eficiência do modelo como método de Energias de Ativação

Tabela 26 - Parâmetros cinéticos levantados do modelo de Avrami para a liga Ni50Ti36Hf14, para as fitas obtidas por solidificação rápida Melt-Spinning.

Φ(°C/min.)	Ln K'			n'		
		±	%		±	%
2,5	-4, 6015	0, 00004	0, 00087	1, 00065	0, 00001	0, 00099
5,0	-4, 6013	0, 00004	0, 00087	1, 00069	0, 00001	0, 00999
10,0	-4, 6016	0, 00006	0, 00130	1, 00062	0, 00001	0, 00099
15,0	-4, 6000	0, 00003	0, 00065	1, 00082	0, 00001	0, 00099
20,0	-4, 6014	0, 00006	0, 00130	1, 00072	0, 00002	0, 00199

Fonte – Autoria própria

Tabela 27 - Parâmetros cinéticos levantados do modelo de Avrami para a liga Ni50Ti30Hf20, para as fitas obtidas por solidificação rápida Melt-Spinning.

Φ(°C/min.)	Ln K'			n'		
		±	%		±	%
5,0	-4, 60163	0, 00005	0, 00108	1, 00064	0, 00001	0, 00099
20,0	-4, 60156	0, 00006	0, 00130	1, 00066	0, 00001	0, 00130

Fonte – Autoria própria

As energias de ativação aparente para as transformações de martensita-austenita pode ser calculado, tendo em vista que (Qap) parte dos valores das frações transformadas fomentando a equação do modelo de Arrhenius. A equação de Arrhenius é descrita na Equação 4.

$$r = A.\exp\left(\frac{-Q_{ap}}{RT}\right) \quad (4)$$

A equação de Arrhenius possibilita a análise das energias de ativação em funcão das frações transformadas em cada instante (MARTINS JÚNIOR et al. 2023). A partir desta equação os gráficos presentes na Figura 5 foram gerados, a partir do Ln(taxa) em s^{-1} versus o inverso da temperature em (K) em cada ponto, o que gera aproximadamente retas, onde as inclinações destas retas dão (-Qap/R). Tendo em vista que R é a constante dos gases ideais e, portanto, um valor constante e conhecido (8,314 J/mol K) foram calculados os valores das energias de ativação (Qap) presentes na Tabela 5.

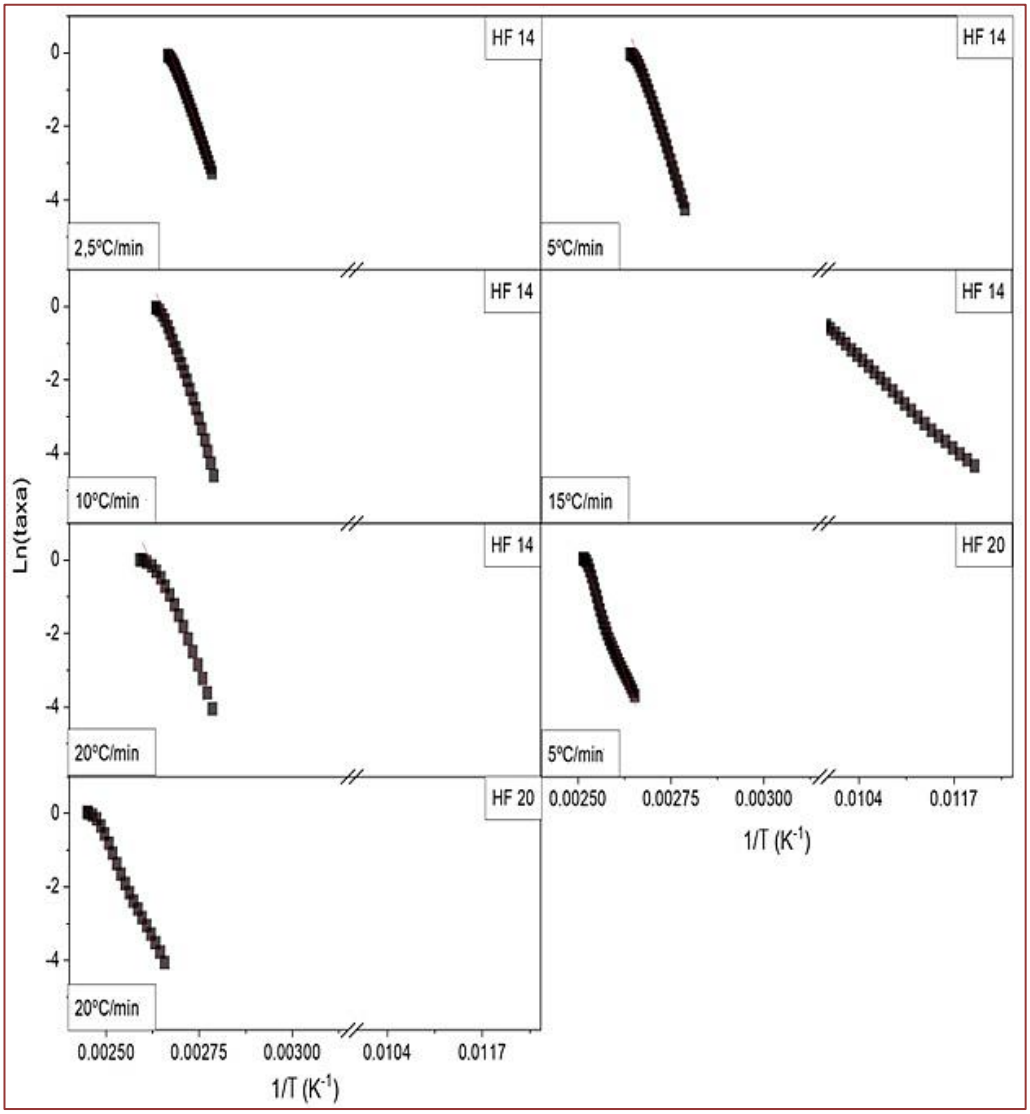
Observa-se na Tabela 5 correlações diretas tanto entre as (Q_{ap}) e as taxas de aquecimento, bem como, entre as (Q_{ap}) e as mudanças de composição adotadas. Nota-se que, à medida que, se elevou as taxas de aquecimento, houve um decremento, quase proporcional, nas (Q_{ap}). Este comportamento é previsto na literatura, tendo em vista que, sob este ponto, pode-se observar que, ao se elevar a força motriz, aumentando-se a taxa de aquecimento, causa-se uma redução da energia critica de nucleação de fase, bem como, um aumento na taxa de transformação (KHALIL-ALLAFI et al. 2021).

Tabela 28 - Energias de ativação obtidas pelo método de Arrhenius para cada composição experimental.

Taxa de Aquecimento (°C/min.)	Q_{ap} Ni50Ti36Hf14	Q_{ap} Ni50Ti30Hf20
2,5	236,80	Pico Duplo
5,0	256,45	241,50
10,0	251,27	Pico duplo
15,0	246,11	Pico duplo
20,0	185,49	175,80

Fonte – Autoria propria.

Figura 30 - Gráficos de Arrhenius das diferentes composições, nas diferentes condições experimentais (fitas).



Fonte – Autoria própria.

4. CONCLUSÕES

1. As entalpias de transformação obtidas experimentalmente refletiram a atividade térmica, pois aumentaram proporcionalmente com o aumento das taxas de aquecimento.
2. As temperaturas de transformação aumentaram proporcionalmente para adicionar o elemento ternário háfnio à composição da liga.
3. O método Avrami adaptado provou ser uma ferramenta eficiente para descrever o fenômeno de transformação de fase, uma vez que as medidas de dispersão geradas foram bastante aceitáveis.
4. O modelo adaptado de Avrami obteve um valor de n (expoente de Avrami) consistente com a teoria de Avrami para o tipo de nucleação que ocorre nas transformações martensita-austenita.
5. O modelo cinético de Arrhenius (a partir das energias de ativação aparentes obtidas) diminuíram de acordo com a elevação das taxas de aquecimento, tendo em vista que, ao se elevar a força motriz, através do aumento nas taxas, causa-se uma redução da energia critica de nucleação de fase, bem como, um aumento na taxa de transformação.

AGRADECIMENTOS

Esta pesquisa foi financiada pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES). Os autores gostariam de agradecer também ao Laboratório Multidisciplinar de Materiais e Estruturas Ativas (LaMMEA) pelo apoio ao desenvolvimento e infraestrutura.

REFERÊNCIAS

[1] AVRAMI, M. Kinetics of phase change. I: General theory. The Journal of Chemical Physics, v. 7, n. 12, p. 1103–1112, 1939a.

[2] AVRAMI, M. Kinetics of phase change. I: General theory. The Journal of Chemical Physics, v. 7, n. 12, p. 1103–1112, 1939b.

[3] AVRAMI, M. Kinetics of phase change. II Transformation-time relations for random distribution of nuclei. The Journal of Chemical Physics, v. 8, n. 2, p. 212–224, 1940.

[4] BRITO, G. R.; DE CASTRO, W. B.; SOARES, R. L. Effect of Heating Rate on the Kinetics of Martensitic Transformation of Ni-Ti-Hf alloys using Differential Scanning Calorimetry (DSC). Materials Research, v. 27, 2024.

[5] DZOGBEWU, T. C.; DE BEER, D. J. Additive manufacturing of NiTi shape memory alloy and its industrial applications. HeliyonElsevier Ltd, , 15 jan. 2024.

[6] FANG, H.; WONG, B.; BAI, Y. Kinetic modelling of thermophysical properties of shape memory alloys during phase transformation. Construction and Building Materials, v. 131, p. 146–155, 2017.

[7] HONG, S. H. et al. Ultrafine shape memory alloys synthesized using a metastable metallic glass precursor with polymorphic crystallization. Applied Materials Today, v. 22, 1 mar. 2021.

[8] JIANG, M. et al. Hot deformation behavior of Ni50.4Ti34.6Hf15 high-temperature shape memory alloy. Journal of Materials Research and Technology, v. 28, p. 1165–1176, 1 jan. 2024.

[9] KHALIL-ALLAFI, J. et al. A survey on crystallization kinetic behavior of direct current magnetron sputter deposited NiTi thin films. Physica B: Condensed Matter, v. 615, 15 ago. 2021.

[10] MARTINS JÚNIOR, C. B. et al. Characterization of NiTiNb10.5 shape memory alloy: microstructural aspects and high-temperature oxidation behavior. Corrosion Science, v. 225, 1 dez. 2023.

[11] MENG, X. L. et al. Microstructure of stress-induced martensite in a Ti-Ni-Hf high temperature shape memory alloy. Scripta Materialia, v. 45, n. 10, p. 1177–1182, 2001.

[12] POITOUT, D. G. Biomechanics and biomaterials in orthopedics, second edition. Biomechanics and Biomaterials in Orthopedics, Second Edition, p. 1–547, 2016.

[13] SOARES, R. CARACTERIZAÇÂO TÉRMICA E ESTRUTURAL DE LIGAS Ni50Ti50-xHfx.at% COM EFEITO MEMÓRIA DE FORMA. Tese de Doutorado, 2019.

[14] TIAN, X. et al. The effect of Fe doping on the crystallization kinetics of Ni-Mn-Sn free-standing alloy thin films. Journal of Non-Crystalline Solids, v. 495, p. 19–26, 1 set. 2018.

[15] WANG, K.; CHEN, L. Crystallization kinetics of Sb70Se30 thin films for phase change memories under the non-isothermal conditions. Journal of Crystal Growth, v. 624, 15 dez. 2023.

[16] YI, X. et al. Insights into the martensitic transformation kinetics and mechanical properties of quaternary Ti-Ni-Nb-V shape memory alloys. Journal of Materials Research and Technology, v. 19, p. 557–565, 1 jul. 2022.

[17] ZHOU, Z. N. et al. Martensitic transformations and kinetics in Ni-Mn-In-Mg shape memory alloys. Intermetallics, v. 92, n. September 2017, p. 49–54, 2018a.

[18] ZHOU, Z. N. et al. Martensitic transformations and kinetics in Ni-Mn-In-Mg shape memory alloys. Intermetallics, v. 92, n. September 2017, p. 49–54, 2018b.

[19] ZOTOV, N.; MARZYNKEVITSCH, V.; MITTEMEIJER, E. J. Evaluation of kinetic equations describing the martensite-austenite phase transformation in NiTi shape memory alloys. Journal of Alloys and Compounds, v. 616, p. 385–393, 2014a.

[20] ZOTOV, N.; MARZYNKEVITSCH, V.; MITTEMEIJER, E. J. Evaluation of kinetic equations describing the martensite-austenite phase transformation in NiTi shape memory alloys. Journal of Alloys and Compounds, v. 616, p. 385–393, 2014b.

Capítulo 13

Estrutura/propriedades da liga superelástica Ti-27Nb(%at) produzida por fusão a arco e laminada a frio

Vitória Hellem Marques Costa Guedes[1]
Suelene Silva Araújo[2]

Resumo: As ligas com memória de forma (LMF) à base de NiTi são amplamente empregadas na medicina devido às suas excelentes propriedades mecânicas, alta resistência à corrosão e notável biocompatibilidade. Contudo, o níquel pode apresentar riscos de toxicidade. Como alternativa, surgem as ligas Ti-Nb, compostas exclusivamente por elementos biocompatíveis, a qual oferecem menor toxicidade e propriedades mecânicas satisfatórias. Este estudo concentrou-se na produção e caracterização da liga Ti-27Nb (%at) com potencial superelástico. A liga foi obtida por fusão a arco e submetida a laminação a frio, sendo caracterizada por Análise de Energia Dispersiva de Raios X (EDX), Microscopia Óptica (MO) e Difração de Raios X (DRX). Ensaios de tração foram realizados para avaliar as propriedades de memória de forma. Os difratogramas indicaram predominância da fase β, atribuída à presença de oxigênio, que suprimiu a formação de martensita ortorrômbica e estabilizou a fase β à temperatura ambiente. Embora a liga fosse esperada para exibir comportamento superelástico, foi observado um comportamento de deformação permanente. Isso ocorreu possivelmente devido à elevada tensão crítica necessária para induzir a transformação martensítica reversível, resultando em deformação plástica irreversível na fase β. Tal comportamento pode ser associado à introdução de oxigênio, que, ao ocupar posições intersticiais na matriz Ti-Nb, promoveu endurecimento por solução sólida, aumentando a resistência do material e inibindo a superelasticidade, favorecendo a deformação permanente. Em termos de recuperação superelástica, a liga apresentou um valor de aproximadamente 1,3%. As micrografias revelaram que as etapas de processamento influenciaram diretamente a microestrutura, evidenciando características típicas da fase β com estrutura cúbica de corpo centrado, em conformidade com os resultados de DRX. Esses resultados sugerem que a liga Ti-27Nb é promissora para aplicações onde a superelasticidade não seja essencial, como nos setores aeroespacial e automotivo, ampliando seu potencial de utilização além do campo biomédico.

Palavras-chaves: Ligas com Memória de Forma (LMF), Ligas *Ni-free*, Ligas Ti-Nb, Superelasticidade, Propriedades.

[1] Estudante de Pós Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais - PPG-CEMat – UFCG
[2] Estudante de Pós Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais - PPG-CEMat – UFCG

1. INTRODUÇÃO

As Ligas com Memória de Forma (LMF) são materiais inteligentes capazes de retornar à sua forma original após sofrerem grandes deformações. Esses materiais apresentam duas propriedades principais: o Efeito de Memória de Forma (EMF) e a Superelasticidade (SE). No caso do EMF, o retorno à forma original ocorre por meio de um estímulo, o aquecimento. Já na SE, o material recupera sua forma original espontaneamente, apenas com a remoção da tensão mecânica aplicada, dispensando o aquecimento. Entre as LMF, as ligas de Ni-Ti (Nitinol) se destacam devido às suas excelentes propriedades, como baixo módulo elástico, alta resistência mecânica e superior resistência à corrosão, características que as tornam amplamente utilizadas no campo biomédico. No entanto, a presença de níquel nessas ligas levanta preocupações quanto a potenciais efeitos adversos à saúde, incluindo toxicidade, reações de hipersensibilidade e alergias.

Recentemente, houve avanços significativos no desenvolvimento de LMF integrando as propriedades funcionais das ligas de Ni-Ti com maior segurança e biocompatibilidade. As ligas de titânio do tipo β, como as de Ti-Nb, emergiram como alternativas promissoras para aplicações biomédicas, mantendo as propriedades de efeito de memória de forma e superelasticidade, e sendo isentas de níquel. Essas ligas não apenas oferecem alta resistência à corrosão, mas também se destacam por sua boa biocompatibilidade, elevada resistência e baixo módulo elástico. Um aspecto relevante é a não toxicidade e a ausência de alergenicidade do nióbio (Nb) (YASZIMSKI, 2003; HANADA, 2005). Ademais, o fato de o Brasil ser o maior produtor mundial de nióbio sugere a viabilidade de produção de ligas do sistema Ti-Nb a um custo competitivo.

No que diz respeito às propriedades de memória de forma no sistema binário Ti-Nb, a transformação entre a fase β, com estrutura cúbica centrada no corpo, e a fase martensítica α'', com estrutura ortorrômbica, é crucial para o comportamento de EMF e SE. Relatos indicam que ligas Ti–(22–25)Nb (at.%) exibem um efeito de memória de forma, enquanto ligas Ti–(25,5–27)Nb demonstram comportamento superelástico. Para que o efeito superelástico seja obtido, é necessária uma microestrutura inicial totalmente β.

Adicionalmente, as ligas de Ti-Nb apresentam uma afinidade significativa por elementos intersticiais, como o oxigênio. A inclusão desses elementos pode impactar as propriedades microestruturais e mecânicas da liga. Estudos recentes demonstraram que a formação de martensita α'' é inibida pela adição de oxigênio em ligas Ti-24Nb e Ti-25Nb (RAMAROLAHY *et al*., 2012; GOLASINSKI *et al*., 2024). A pesquisa de Kim *et al*. (2005) revelou que a adição de apenas 1 at.% de oxigênio pode diminuir a temperatura de início da transformação martensítica (Ms) em cerca de 160 K na liga Ti–22Nb. Esses achados ressaltam a importância de entender o papel dos elementos intersticiais nas propriedades das ligas de Ti-Nb e sua relevância para o desenvolvimento de materiais destinados a aplicações biomédicas.

Portanto, o presente estudo tem como objetivo a obtenção, processamento e caracterização da liga superelástica Ti-27Nb (%at.), produzida por fusão a arco e, subsequentemente, laminada a frio até uma redução de 90%. As análises microestruturais foram realizadas por meio das técnicas como Difração de Raios-X (DRX) e Microscopia Óptica (MO). Ensaios de tração também foram conduzidos para avaliar as propriedades de memória de forma dessa liga, oferecendo informações valiosas para suas diversas aplicações, especialmente na indústria biomédica.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. PREPARAÇÃO DA LIGA

A liga binária Ti-27Nb (at%) foi obtida a partir de Titânio puro grau II e Nióbio com pureza de 99,7%. Os materiais iniciais foram cuidadosamente preparados e posicionados em um cadinho de cobre, sendo posteriormente submetidos ao processo de fusão por arco. A fusão foi realizada utilizando um eletrodo de tungstênio não consumível em uma atmosfera protetora de argônio, empregando uma máquina da EDG, modelo Discovery All Metals. Para assegurar a homogeneização da liga, foram realizadas quatro fusões consecutivas para cada pastilha, com rotação de 180° da liga entre cada etapa de fusão. Na etapa final, a pastilha formada foi fundida em um cadinho especial moldado em formato de lingote, visando facilitar o processo subsequente de laminação. O lingote produzido apresentou uma massa final de 10 g.

2.2. LAMINAÇÃO A FRIO DA LIGA

Após a produção da liga Ti-Nb, o lingote passou pelo processo de laminação a frio, reduzindo sua espessura em 90% até formar uma lâmina de 1 mm. A chapa laminada foi cortada por eletroerosão a fio, afim de obter amostras de 10x10 (mm) para caracterização microestrutural e corpos de prova do tipo "gravata" para testes de tração. Em seguida, parte das amostras foram submetidas a um tratamento térmico a 650°C por 10 minutos, seguido de têmpera em água, para aliviar as tensões residuais da laminação e garantir a integridade estrutural da liga.

2.3. PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

As amostras foram preparadas, nomeadas e estudadas conforme as etapas do processamento. Inicialmente, uma amostra de 1 mm foi extraída do lingote obtido após o processo de fusão a arco, sendo denominada "bruta de fusão". Após a etapa de laminação, foi analisada uma amostra de 10x10 (mm) sem tratamento térmico, denominada "laminada". Em outra amostra laminada, foi realizado o tratamento térmico, sendo esta denominada "laminada e tratada". Todas as amostras passaram por um processo metalográfico de lixamento e polimento antes de serem submetidas às análises de Microscopia Óptica (MO) e Difração de Raios X (DRX). Para o ensaio de tração, o corpo de prova retirado da chapa de TiNb foi tratado termicamente.

2.4. MICROSCOPIA ÓPTICA

Para a análise da microestrutura superficial, as amostras de 10x10 (mm) da liga foram atacadas quimicamente para revelar a microestrutura, foi utilizada uma solução de reagente Kroll composta por 5 mL de ácido fluorídrico (HF), 10 mL de ácido nítrico (HNO3) e 85 mL de água destilada (H2O). O tempo de ataque variou entre 5s a 80s. As imagens foram obtidas utilizando um microscópio Olympus BX51M.

2.5. ANÁLISE DAS FASES

Para identificar as fases presentes, amostras da liga Ti-27Nb com dimensões de 10x10 mm foram caracterizadas por Difração de Raios X (DRX). O ensaio foi realizado

utilizando radiação CuKα, com tensão de 30 kV e corrente de 30 mA. A varredura angular (2θ) foi conduzida no intervalo de 30° a 90°, com uma taxa de varredura de 2° min^{-1}.

2.6. TESTES DE TRAÇÃO

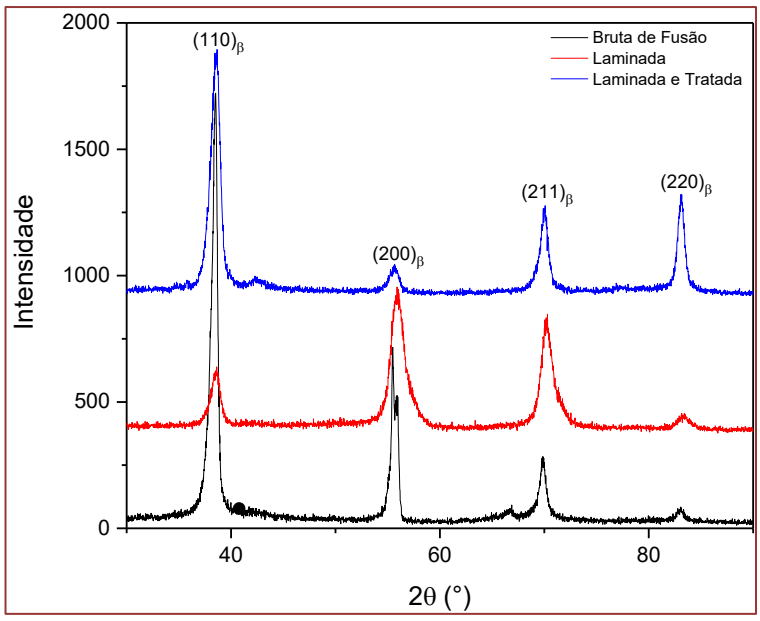
As propriedades mecânicas foram avaliadas a partir de ensaios de tração quase-estático em máquina universal da marca Instron, modelo 5582, com a deformação aferida com vídeo-extensômetro (AVE). O comportamento de memória de forma foi caracterizado a partir de ensaios de tração de carregamento-descarregamento com acréscimo de 0,5% de deformação em relação ao ciclo anterior até o carregamento final de 6%. Após o descarregamento do último ciclo, o CP foi levado à ruptura. Além disso, foi realizado um ensaio de ciclagem para analisar o comportamento cíclico mecânico da liga após a aplicação de 25 ciclos de carregamento e descarregamento, utilizando como referência a deformação máxima recuperada no ensaio anterior. Os testes foram conduzidos sob taxa de deformação de 1,5%/min e a uma temperatura de 37°C, que corresponde a temperatura corpórea.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. DIFRAÇÃO DE RAIO-X

A estrutura da liga preparada foi analisada por difração de raios X nas amostras após os processos de fusão (bruta), laminação e tratamento térmico de recozimento, conforme pode ser observado na Figura 1.

Figura 1 – Difratograma de raios X para as amostras da liga Ti-27Nb após fusão (bruta), laminação e tratamento térmico.



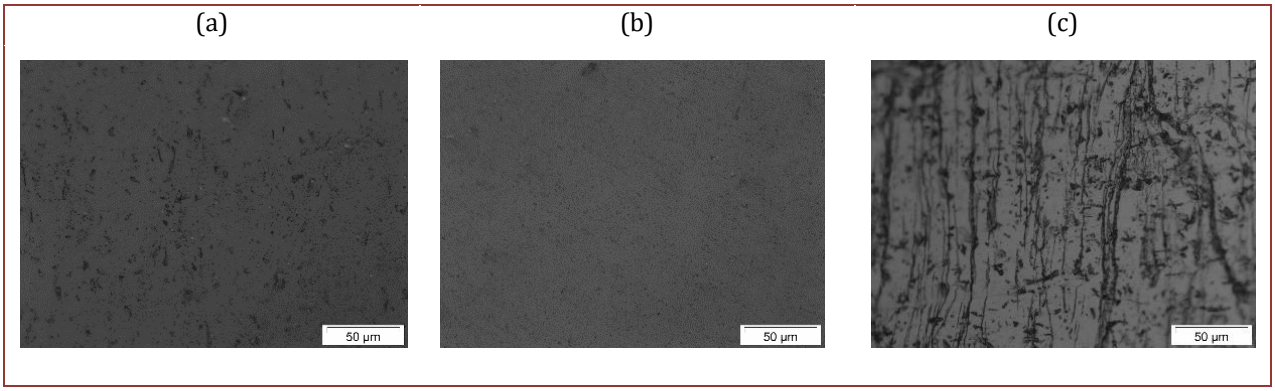
Fonte: Autoria própria (2024).

Os padrões de difração de raios-X (DRX) indicaram que a liga Ti-27Nb possui uma microestrutura composta exclusivamente pela fase β, que é suscetível à transformação reversível entre a fase β e a martensita ortorrômbica (fase α"), conforme evidenciado por Myiazaki *et al*. (2018a). Os picos de difração nas direções cristalográficas (110), (200), (211) e (220) confirmam a predominância da fase β, sugerindo o potencial da liga para exibir superelasticidade. No entanto, a incorporação de elementos intersticiais, como oxigênio, durante a fabricação pode alterar as propriedades da liga (NOVAIS, 2023). Tahara *et al*. (2011) relatam que o oxigênio atua como um supressor da formação da fase martensítica, favorecendo a estabilização da fase β metaestável ao reduzir a temperatura de início da formação de martensita durante o resfriamento. Essa estabilização é fundamental para a superelasticidade, permitindo que a fase β metaestável se transforme na fase martensítica α" sob carga mecânica, viabilizando deformações reversíveis, essenciais para aplicações em dispositivos médicos e materiais com memória de forma. Além disso, os tratamentos termomecânicos, como a laminação a frio e o recozimento, não provocaram alterações estruturais significativas, mantendo a estabilidade da fase β durante todo o processamento, o que é crucial para a preservação das propriedades estruturais e a confiabilidade dos componentes.

3.2. ANÁLISE MICROESTRUTURAL

A Figura 2 mostra imagem de microscópio óptico da microestrutura da liga Ti-27Nb (%at) realizado nas amostras após fusão (bruta), laminação e tratamento térmico.

Figura 2 – Micrografias obtidas por microscopia óptica para as amostras da ligaTi-27Nb após (a) fusão, (b) laminação e (c) tratamento térmico.



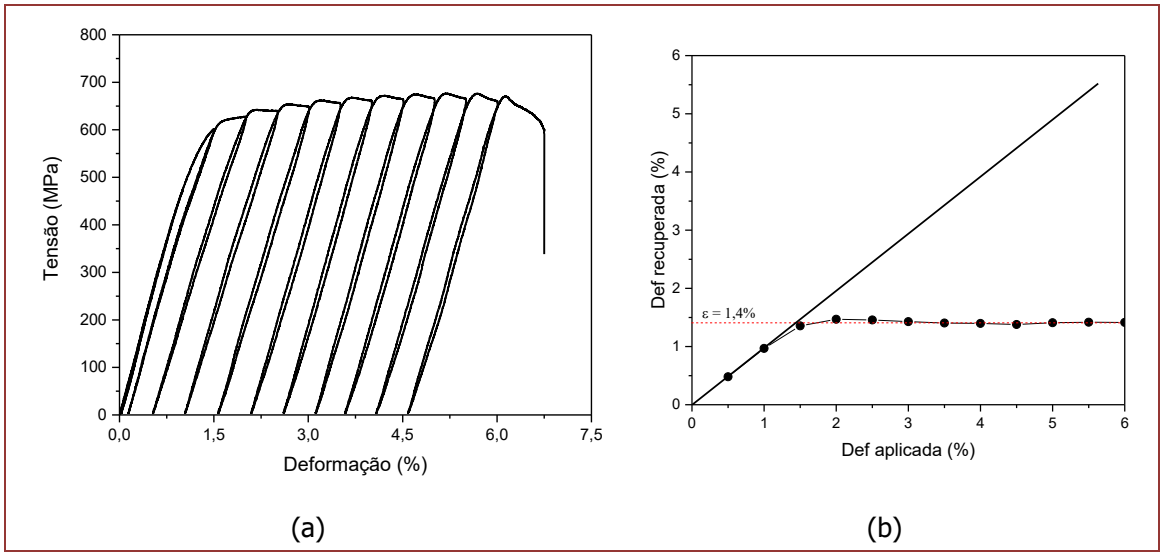
De acordo com a micrografias apresentadas na Figura 2, as etapas de processamento exerceram um impacto significativo sobre a microestrutura das amostras revelando características típicas de uma estrutura cristalina cúbica de corpo centrado, conhecida como fase β, em concordância com os resultados obtidos por difração de raios X (DRX). Na Figura 2(a) que corresponde a amostra logo após a fusão, observa-se uma superfície uniforme, atribuída à predominância da fase β. Após a laminação a frio (Figura 2b), nota-se uma redução considerável no tamanho dos grãos, resultado do processo de deformação intensa. Já a Figura 2(c) que corresponde a amostra submetida ao tratamento térmico, é possível identificar a formação de grãos grandes e alongados, consequência do alívio das tensões geradas pela laminação. Esses achados estão em concordância com Silva (2014), que observou comportamento semelhante em amostras de Ti-Nb brutas de

fusão, laminadas e tratadas termicamente. Ademais, esses tratamentos combinados resultam em um material que equilibra ductilidade e resistência, tornando-o adequado para uma ampla gama de futuras aplicações.

3.3. TESTES DE TRAÇÃO

A Figura 3 mostra o resultado do ensaio de tração realizado a 37 °C na liga Ti-27Nb, laminada a frio até atingir 1 mm de espessura e posteriormente tratada termicamente, com aumento gradativo na deformação aplicada.

Figura 3 – (a) Resultado do ensaio de tração sob deformação gradativa a 37°C e (b) gráfico de deformação aplicada *versus* deformação recuperada na liga Ti-27Nb.



Fonte: Autoria própria (2024).

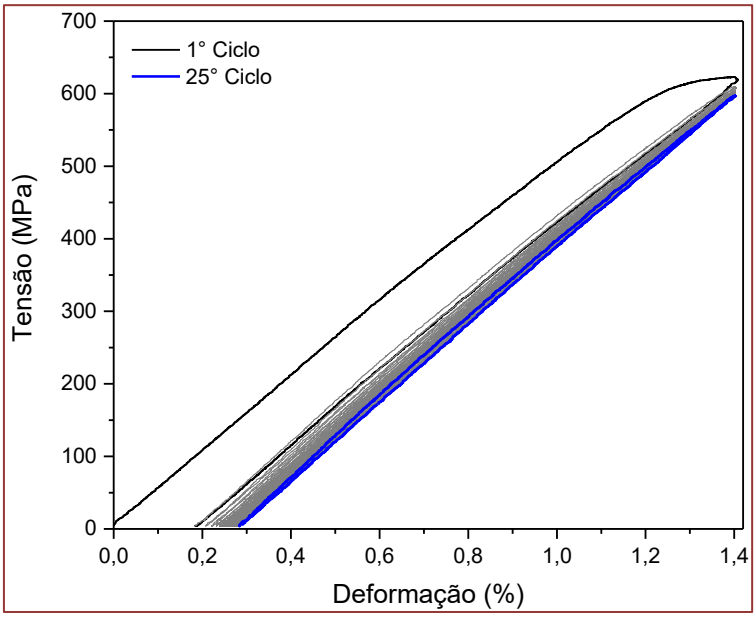
A Figura 3(a) apresenta os resultados do ensaio de tração, revelando uma tensão máxima de 700 MPa e uma deformação até a ruptura de 6,5%. Embora se esperasse que a liga Ti-27Nb exibisse comportamento superelástico, como sugerido por Kim e Miyazaki (2015), os dados indicam um efeito de deformação permanente, resultado da alta tensão necessária para a transformação da fase β para a α". Esse comportamento pode estar relacionado à presença de elementos intersticiais como o oxigênio, que, segundo Novais (2023), podem ser introduzidos durante o processo de fabricação e têm papel essencial na alteração das propriedades da liga.

Kim e Miyazaki (2018b) constataram que a adição de 1% de oxigênio em ligas Ti-(27-28)Nb impacta significativamente as propriedades de memória de forma, promovendo deformação permanente e aumentando substancialmente a tensão necessária para induzir a transformação de fase. Esse efeito ocorre porque o oxigênio ocupa posições intersticiais entre os átomos de titânio e nióbio, gerando distorções na rede cristalina e formando nanodomínios. Esses nanodomínios, constituídos por pequenas regiões com estrutura cristalina ligeiramente alterada, modificam as propriedades estruturais da liga. Além disso, contribuem para o endurecimento por solução sólida, exigindo uma tensão ainda maior para a formação de martensita e, como resultado, elevando a resistência máxima da liga.

Na Figura 3(b), é possível ver a deformação recuperada em função da deformação máxima aplicada. Observa-se que a medida que a deformação máxima aumenta, a recuperação da deformação pela liga Ti-Nb diminui, devido à plastificação da martensita induzida por tensão. Deformações de 0,5% e 1% resultam em recuperação total, enquanto uma deformação de 1,5% leva a uma recuperação de 1,36%, deixando uma deformação residual de 0,15%. A deformação recuperada estabiliza em 1,4%, sendo a máxima recuperável pela liga Ti-Nb, usada como referência para ensaios subsequentes.

Após determinar o limite da liga, realizou-se um ensaio de tração aplicando 25 ciclos de carregamento e descarregamento a 37 °C, adotando a deformação máxima previamente encontrada para a liga Ti-27Nb. O resultado está apresentado na Figura 4.

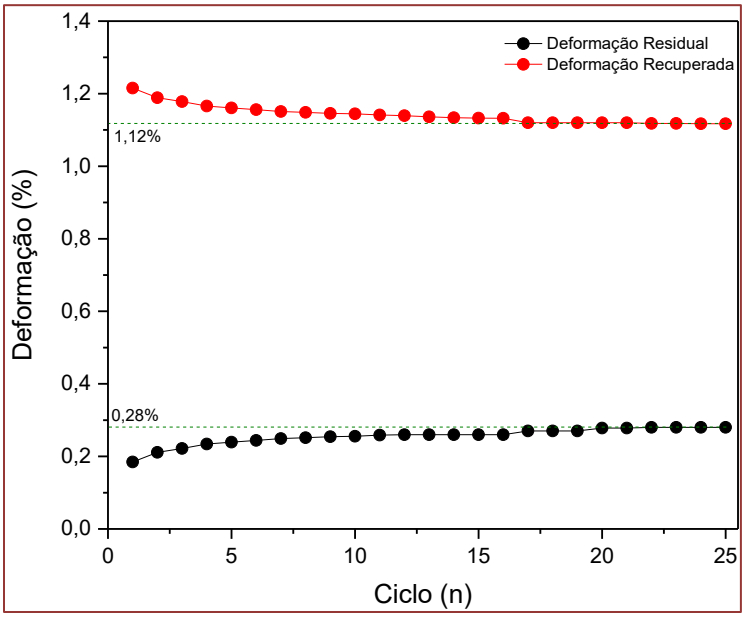
Figura 4 - Resultado de ciclagem em tração realizado na liga Ti-Nb.



Fonte: Autoria Própria (2024).

Esse teste é crucial para analisar o comportamento da liga e sua estabilização após um determinado número de ciclos. A Figura 4 demonstra que as ligas atingiram a estabilização após os 25 ciclos realizados. Baseado em dados e observações realizadas, constatou-se que a tensão máxima do primeiro ciclo foi de 621,36 MPa e que com o aumento na quantidade de ciclos, verificou-se aumento na deformação residual e redução na deformação recuperada. A Figura 5 traz as deformações residuais e recuperadas em função da quantidade de ciclos.

Figura 5 –Variação das tensões de transformação direta inicial e final em função da quantidade de ciclos em liga Ti-27Nb.



Fonte: Autoria Própria (2024).

A análise da Figura 5 revela uma tendência de estabilização da deformação residual à medida que aumenta o número de ciclos. Esse comportamento é esperado para Ligas com Memória de Forma sob carregamentos cíclicos, como relatado por Lima *et al*. (2021) para a liga Ni-Ti e por Tahara *et al*. (2009) para a liga Ti-26Nb. A diferença na deformação residual entre o primeiro e o segundo ciclo se deve à plastificação da martensita induzida por tensão durante o carregamento. Após o descarregamento, essa martensita plastificada não retorna para a fase β, resultando em uma deformação final constante. Conforme a deformação acumulada aumenta, cada ciclo subsequente gera menores níveis de deformação, causando acúmulo na deformação residual e, consequentemente, reduzindo a deformação recuperada. Churck *et al*. (2023) observaram resultados semelhantes em ligas de titânio β (Ti-24Nb-4Zr-8Sn, wt%) após 20 ciclos.

As médias e desvios padrão da deformação residual e da deformação recuperada entre os primeiros cinco ciclos e entre os últimos cinco ciclos foram calculados e dispostos na Tabela 1.

Tabela 1 - Médias e desvios padrão (DP) da deformação residual e da deformação recuperada, considerando os cinco ciclos iniciais e os cinco ciclos finais analisados.

Ciclo	Deformação residual (%)		Deformação recuperada (%)	
	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão
1° a 5°	0,22	0,022	1,18	0,022
21° a 25°	0,28	0,004	1,12	0,004

Fonte: Autoria Própria (2024).

Como apresentado na Tabela 1, observou-se uma redução expressiva no desvio padrão das propriedades avaliadas entre os cinco primeiros ciclos e os cinco ciclos finais. Esse padrão sugere que a liga atingiu uma condição de estabilidade mecânica ao longo dos ciclos. Resultados similares foram relatados por Novais (2023) para a liga Ti-25Nb, que também passou por laminação a frio e tratamento térmico.

4. CONCLUSÕES

Este estudo avaliou o comportamento da liga Ti-27Nb, produzida por fusão a arco e laminação a frio, e os resultados revelaram um limite de recuperação superelástica de 1,3%, uma tensão máxima de 660 MPa e uma deformação máxima de 6,5% até a ruptura, testada a 37 °C. A análise por difração de raios X confirmou a presença exclusiva da fase β, que pode ter sido estabilizada devido à possível introdução de oxigênio durante o processo de fabricação da liga. Isso é fundamental, pois a fase β metaestável tem potencial para superelasticidade, decorrente da transformação reversível em martensita ortorrômbica sob tensão. Além disso, a liga laminada a frio, com redução de 90% (espessura final de 1 mm), demonstrou estabilidade após 25 ciclos de teste. Contudo, a presença de oxigênio, incorporado como elemento intersticial durante a fabricação, afetou negativamente o comportamento superelástico da liga, levando à ocorrência de deformação permanente. Embora a liga não tenha exibido o comportamento de memória de forma esperado, suas propriedades a tornam uma alternativa viável para aplicações onde a superelasticidade não seja crucial, como nas indústrias aeroespacial e automotiva, expandindo seu potencial de uso para além do setor biomédico.

REFERÊNCIAS

[1] CHURCK, N.; TALBOT, C.; CONNOR, L.; MICHALIK, S.; JONES, N. Functional Fatigue During Superelastic Load Cycling of Ti2448 (Ti-24Nb-4Zr-8Sn, wt%). Materialia, v. 28,p. 101719, 2023.

[2] GOLASIN SKI, K. M. *et al*. Full-Field Deformation Study of Ti–25Nb, Ti–25Nb–0.3O and Ti–25Nb–0.7O Shape Memory Alloys During Tension Using Digital Image Correlation. Metall Mater Trans A, v. 55, p. 2509–2518, 2024. https://doi.org/10.1007/s11661-024-07414-8

[3] HANADA, S.; MATSUMOTO, H.; WATANABE, S. Mechanical compatibility of titanium implants in hard tissues. Materials Research, v.1284, p.239-247, 2005.

[4] KIM, H. Y.; MIYAZAKI, S. Shape Memory Effect and Superelasticity. In: KIM, H. Y.; MIYAZAKI, S. (Ed.). Ni-Free Ti-Based Shape Memory Alloys. [S.l.]: Butterworth-Heinemann, 2018a. p. 181–191. ISBN 9780128094013.

[5] KIM, H. Y.; MIYAZAKI, S. Effect of Interstitial Alloying Elements on Shape Memory and Superelastic Properties. In: KIM, H. Y.; MIYAZAKI, S. (Ed.). Ni-Free Ti-Based Shape Memory Alloys. [S.l.]: Butterworth-Heinemann, 2018b. p. 181–191. ISBN 9780128094013.

[6] KIM, H. Y.; SATORU, H.; KIM, J. I.; HOSODA, H.; MIYAZAKI, S. Mechanical properties and shape memory behavior of Ti-Nb alloys. Materials Transactions, v. 45, n. 7, p. 2443–2448, 2004. ISSN 13459678.

[7] KIM, J.; KIM, H. Y.; HOSODA, H.; MIYAZAKI, S. Shape Memory Behavior of Ti–22Nb–(0.5–2.0)O(at%) Biomedical Alloys. Materials Transactions, v. 46, n. 4, p. 852–857, 2005.

[8] KIM, H. Y.; MIYAZAKI, S. Martensitic transformation and superelastic properties of Ti-Nb base alloys. Materials Transactions, v. 56, n. 5, p. 625–634, 2015. ISSN 13459678.

[9] LIMA, P. C.; RODRIGUES, P. F.; RAMOS, A. S.; COSTA, J. D. M. da; FERNANDES, F. M. B.; VIEIRA, M. T. Experimental analysis of niti alloy during strain-controlled low-cycle fatigue. Materials, MDPI AG, v. 14, p. 4455, 8 2021. ISSN 1996-1944.

[10] NOVAIS, D. J. F. V. Liga superelástica ti-25nb (%at): processamento, caracterização e protótipos de dispositivos implantáveis. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, 2023.

[11] RAMAROLAHY, A. *et al*. Microstructure and mechanical behavior of superelastic Ti-24Nb-0.5O and Ti-24Nb-0.5N biomedical alloys. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, v. 9, p. 83-90, 2012.

[12] SILVA, L. M. Efeito de Elementos Substitucionais e Intersticiais na Microestrutura, Dureza e Módulo de Elasticidade de Ligas Ti-Nb. Tese (Doutorado em Ciências dos Materiais) – Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Ciências, Bauru, 2014.

[13] TAHARA, M.; KIM, H. Y.; HOSODA, H.; MIYAZAKI, S. Cyclic deformation behavior of a Ti-26 at.% Nb alloy. Acta Materialia, Acta Materialia Inc., v. 57, n. 8, p. 2461–2469, 2009. ISSN 13596454.

[14] TAHARA, M.; KIM, H. Y.; INAMURA, T.; HOSODA, H.; MIYAZAKI, S. Lattice modulation and superelasticity in oxygen-added β-Ti alloys. Acta Materialia, Acta Materialia Inc., v. 59, n. 16, p. 6208–6218, 2011. ISSN 13596454.

[15] YASZEMSKI, M. J. *et al.* Biomaterials in orthopedics. 2a Edição. Boca Raton, Flórida: CRC Press, p. 458, 2004. ISBN 9780429074493.

Capítulo 14

Elaboração e caracterização de leite fermentado kefir cremoso com adição de frutas vermelhas

Emily Bezerra Coutinho Cruz[1]
Juliana Tatiaia de Morais Dias[2]
Maria Tereza Sarmento da Fonsêca[3]
Sabrina dos Santos Costa[4]
Manoel Pessoa Ferreira Neto[5]

Resumo: A indústria de alimentos sobre influência das tendências alimentares. Desta forma, desenvolve produtos que satisfaça não apenas as necessidades, como também o desejo dos consumidores, que buscam cada vez mais alimentos saudáveis e com alegação funcional assim, esse estudo objetiva a elaboração e caracterização de leite fermentado kefir com adição de frutas vermelhas (morango, uva e açaí), como uma proposta de produto com características funcionais e melhor perfil nutricional. Tem sido demonstrado que os derivados lácteos como o kefir, apresentam destaque como produtos com denominação funcional. A execução do processamento foi realizada com a adição de 5% de grãos por meio de um delineamento experimental para definir o tempo de 27 horas. Em cada período (0 a 10,24,27) forma avaliados os parâmetros de Ph, acidez em ácido lático e perfil de açúcares, bem como a elaboração do produto e após processo de dessoragem foram adicionadas as caldas de frutas concentradas descritas como KC, KM, KU, KA, KMIX realizando sobre estas amostras análises físico-químicas e microbiológicas. Os resultados obtidos foram satisfatórios destacando que o período de fermentação a 27 horas influenciou na acidez e permitiu uma estabilidade do produto. As análises físicas definiram o produto com consistência mais firme. Foi possível observar com base nos estudos analisados sobre kefir e comparando com o processamento executado neste trabalho que a fermentação estendida para 27 horas proporcionou ao produto resultados satisfatórios, que influenciaram na cremosidade final do produto.

Palavras–chave: alimentos funcionais; delineamento experimental; intolerância à lactose.; potencial antioxidante; produto lácteo.

[1] Estudante do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola- CTRN – UFCG
[2] Estudante do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola- CTRN – UFCG
[3] Estudante do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola- CTRN – UFCG
[4] Estudante do Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Processos- CTRN – UFCG
[5] Estudante do Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos- CTRN – UFCG

1. INTRODUÇÃO

Alimentos funcionais estão ligados à redução de riscos de doenças como doenças cardíacas e câncer por meio de mecanismos como atividade antioxidante e efeitos antiinflamatórios (Vignesh et al., 2024; Sharma et al., 2024). Os derivados lácteos, especialmente os leites fermentados com probióticos, destacam-se nesse contexto, sendo o Kefir um exemplo. Estes produtos são denominados pela Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA), como um produto com propriedades funcionais, por apresentarem componentes que atuem no desenvolvimento ou na manutenção do organismo humano de forma a agir durante o processo metabólico ou fisiológico (BRASIL, 1999).

Dentre os leites fermentados encontra-se o Kefir, que em sua composição envolve diversas bactérias e leveduras que tem como resultado do metabolismo a produção ácido lático, etanol e dióxido de carbono (Brasil, 2007). O Kefir tem comprovado efeito probiótico, equilibrando a microbiota intestinal e oferecendo características sensoriais específicas (NOĞAY, 2019). O kefir contém uma variedade de microrganismos benéficos, incluindo *Lactobacillus* e *Leuconostoc*, que melhoram a saúde intestinal e inibem bactérias patogênicas (Saleem et al., 2023). O kefir é conhecido por produzir enzimas que auxiliam na digestão da lactose, tornando-o adequado para pessoas com intolerância à lactose (Apalowo et al., 2024). Após o processo de dessoragem, sua textura se torna cremosa, semelhante ao iogurte grego, aumentando a qualidade nutricional (Moreira et al., 2018).

O leite fermentado pode ser saborizado com frutas ou polpas, que não só agregam sabor, a incorporação de polpa de frutas aumenta o conteúdo fenólico total, que está associado ao aumento da atividade antioxidante (Lv et al., 2023). Os antioxidantes naturais das frutas vermelhas podem mitigar os efeitos colaterais associados aos medicamentos convencionais para doenças neurodegenerativas (Rahaman et al., 2023). Assim, o presente trabalho tem como objetivo elaborar e caracterizar o leite fermentado, do tipo kefir cremoso adicionado de polpas de frutas vermelhas, açaí (Euterpe oleracea), morango (Fragaria vesca) e uva (Vitis spp.).

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. LOCAL DE EXECUÇÃO

A pesquisa foi realizada nos Laboratórios disponíveis da Universidade Federal da Paraíba (UFPB) sendo utilizado o Laboratório de Leite e derivados, localizado no Centro de Tecnologia (CT), para desenvolvimento dos processos fermentativos e elaboração do produto, Laboratório de Análise Química de Alimentos (LAQA), localizado no Centro de Tecnologia (CT), para execução de análises pertinente a pesquisa utilizou os laboratórios do Centro de Tecnologia e Desenvolvimento Regional (CTDR), complexo parte da UFPB, para completar as análises químicas resultantes da pesquisa bem como realização das análises reológicas do produto todos estes laboratórios e centros localizados na cidade de João Pessoa – PB.

2.2. MATERIAL

Os grãos utilizados para elaboração do leite fermentado kefir cremoso foram obtidos por meio de doação do Campus III da Universidade Federal da Paraíba (UFPB) lotado na cidade de Bananeiras – PB. O leite UHT integral, a polpa das frutas vermelhas

(açaí, morango e uva) e o açúcar foram adquiridos no comércio local da cidade de João Pessoa – PB.

2.3. DELINEAMENTO EXPERIMENTAL

O delineamento experimental foi aplicado em duas etapas, onde a primeira etapa consistiu na elaboração do leite fermentado kefir cremoso a partir da fermentação de grãos de kefir em leite integral UHT, no período de 27 horas de fermentação. Nesta primeira etapa foi realizada avaliação da fermentação através dos parâmetros pH, acidez em ácido lático e perfil de açúcares durante o período de 27 horas A segunda etapa consistiu na elaboração de 5 formulações de kefir cremoso, denominadas de KC (kefir cremoso controle), KM (kefir cremoso adicionado de calda de morango), KU (kefir cremoso adicionado de calda de uva), KA (kefir cremoso adicionado de calda de açaí) e KMIX (kefir cremoso adicionado de calda da mistura de morango, açaí e uva (1:1:1). Em seguida foi realizada a avaliação física das amostras de kefir cremoso, controle e adicionadas de frutas vermelhas, através das análises de acidez em ácido lático e pH AOAC (2000), parâmetros de cor utilizando o colorímetro Konica Minolta (Modelo CR-400) e as análises químicas do kefir controle para os parâmetros umidade, proteínas, lipídeos e cinzas de acordo com a metodologia proposta pela AOAC (2000), microbiológica e sensorial. Os resultados das análises das amostras kefir cremoso foram submetidos à análise de variância com 5% de significância, posteriormente submetidos ao Teste de Tukey, por meio do programa estatístico ASSISTAT 7.7 (SILVA; AZEVEDO, 2016).

A elaboração do kefir cremoso consistiu na ativação dos grãos de kefir e a segunda etapa a inoculação no leite integral UHT, por um período de fermentação de 27 horas. Esse período de fermentação foi selecionado através de teste piloto e observação da cremosidade do produto.

Para a ativação dos grãos de kefir, foi realizada inicialmente um tratamento para adequação a uma nova matriz que este seria inserido executando assim várias lavagens com a água mineral para retirar os resíduos presentes de outras matrizes alimentares onde estava sendo realizado seu cultivo, esse processo foi encerrado até que os grãos estivessem com os glóbulos brancos característicos. Em seguida a esse processo inoculou-se os grãos ao meio proposto, leite integral UHT, adicionou-se os grãos em béquer com 500 mL de leite embalado em papel filme perfurado para manter a circulação do ar devido a característica da co-cultura de microrganismo presente, em temperatura de 25 ºC - 28 ºC por 24 horas. Esse processo ocorreu durante um período de 5 dias com o objetivo de aumentar a quantidade de grãos.

A etapa de inoculação deu-se quando os grãos já estavam adaptados com capacidade de fermentação ativa. Desta forma, foi realizada a fermentação do leite com os grãos em diferentes concentrações (4% m/v, 5% m/v e 6% m/v) e tempos (24 horas e 27 horas), onde obteve melhor resultado fermentativo no período de 27 com os grãos de kefir (5% m/v) em temperatura de 25 º - 28 ºC. Em seguida, realizou-se o processo de dessoragem do leite fermentado por meio de filtros sob refrigeração, para a separação do soro do leite e produção do kefir cremoso, as gramaturas e tempo de refrigeração estão sob domínio do INIPI -BR 10 2020 018001 0.

Para as formulações com adição das caldas de frutas, foram elaboradas as caldas seguindo os parâmetros estabelecidos pelos limites legais descritos na Instrução Normativa nº46/2007 (BRASIL, 2007).

Inicialmente foi realizado um preparo concentrado da polpa da fruta e após os preparos das caldas, foram adicionadas ao kefir cremoso e homogeneizadas levemente, as proporções estão sob domínio do INPI- BR 10 2020 018001 0.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Em relação ao pH foi possível observar que durante o período de fermentação (27 horas) ocorreu um declínio desse parâmetro (Figura 1) devido ao processo fermentativo de consumo de lactose e produção de ácidos, com destaque para ácido lático. O declínio apresenta intensidade moderada durante as primeiras 10 horas e intensifica com 24 horas de fermentação. Por outro lado, embora a produção de ácido lático seja benéfica para o sabor e a preservação, a acidificação excessiva pode prejudicar o crescimento microbiano e a eficiência da fermentação, destacando a necessidade de um monitoramento cuidadoso dos níveis de pH durante o processo de fermentação.

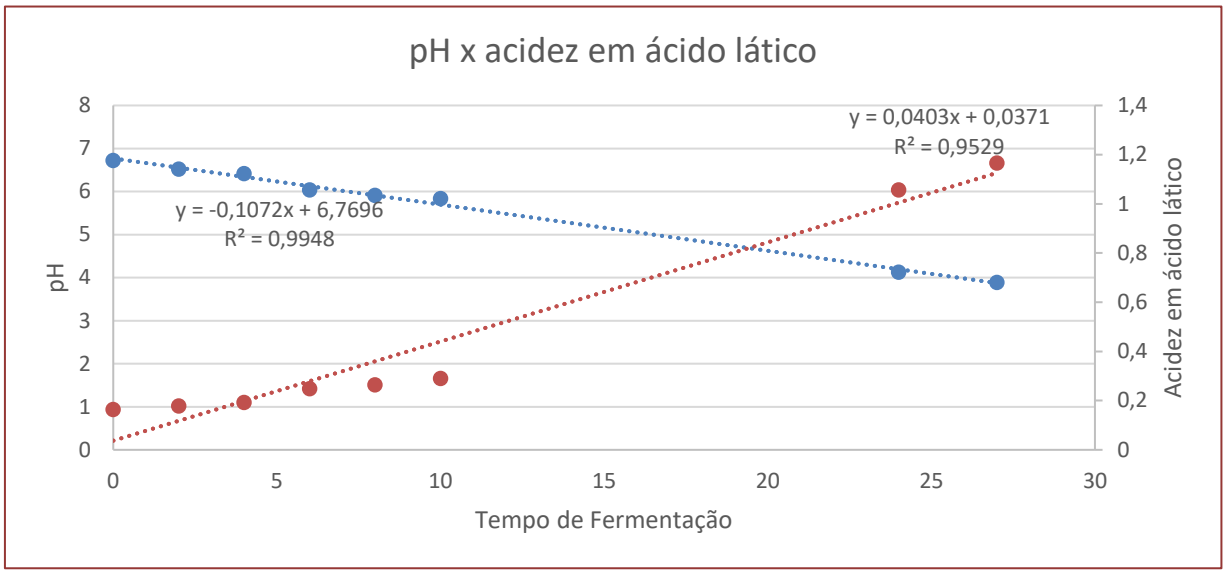
De acordo com Ricc et al. (2018), onde os autores enfatizam que nas primeiras horas de fermentação a atuação das baterias lácticas ocorrem com intensidade menor e consequentemente eleve redução do pH. Este mesmo comportamento das bactérias lácteas foi citado por Chen et al. (2018) avaliando a atuação em outra matriz alimentar (leite fermentado com suco de maçã), apresentando maior taxa de decréscimo a partir de 10 horas de fermentação.

Após 24 horas o pH atingido foi de 4,1 e desta forma apresentou-se abaixo do valor do ponto isoelétrico das proteínas do leite e consequentemente proporcionou ao produto modificações tecnológicas, devido a coagulação ácida (Francis et al., 2019). Logo após atingir 27 horas de fermentação o kefir apresentou maior redução de pH e atingiu um pH de 3,9. O pH mais baixo resultou na liberação do soro do leite, devido a sensibilização das micelas de caseína e consequentemente o produto apresentou consistência mais firme (Park, 2006).

Em concordância com os resultados obtidos do pH, a acidez apresentou comportamento proporcional, acarretando no aumento da produção de ácido láctico durante a fermentação. A legislação que trata sobre o regulamento técnico de identidade e qualidade de leites fermentados regulamenta que os leites fermentados devem apresentar acidez em ácido lático entre 0,6 a 2,0 g de ácido láctico/100g de produto.

Após atingir 27 horas de fermentação o valor de ácido láctico determinado foi de 1,17 g de ácido láctico/100g. Segundo Sing e Shan (2017) as características da composição do kefir pode variar de acordo com a matriz que o grão possa ser inserido. Assim, o kefir de leite apresenta comumente porcentagem de ácido lático de aproximadamente 1,0%.

Figura 1 – Relação pH x ácido lático pelo tempo de fermentação.



Fonte: Autor

Avaliando o teor de lactose durante o intervalo de 10 e 24 horas, observa-se a redução deste açúcar, devido ao processo da fermentação láctica (Tabela 1). Embora o kefir seja reconhecido por suas propriedades benéficas, alguns estudos sugerem que a variabilidade na composição microbiana pode afetar a consistência da hidrólise da lactose e a produção de ácido lático, indicando a necessidade de mais pesquisas para padronizar esses processos para aplicações industriais (Lima, Rosa; 2023)

Fernandez et al. (2019) ao estudar o processo fermentativo de Kefir, observaram que durante a produção, ocorreu um aumento dos monossacarídeos no tempo de 24 horas da fermentação, sendo explicada pela hidrólise da lactose liberando galactose e glicose. A galactose é metabolizada pela via de Leloir que possui como um dos seus produtos o ácido lático e a glicose pela ação da fosfoglicomutase que permite seu metabolismo através da glicólise.

No tempo de fermentação de 27 horas observa-se um aumento do teor de lactose no produto, entretanto esse aumento pode ter ocorrido pois ocorre uma maior liberação do soro do leite e a concentração desse açúcar no soro, neste intervalo de tempo, a coleta realizada antes do processo de dessoragem, sendo assim ocorre a concentração deste componente (Park, 2006).

Tabela 1: Perfil do consumo de açúcares durante o período de fermentação.

Tempo de Fermentação	Lactose	Glicose	Galactose
Fermentação 10h	$2,82^{a}\pm0,07$	$0,35^{a}\pm0,06$	$0,28^{a}\pm0,03$
Fermentação 24h	$1,21^{c}\pm0,01$	$0,22^{a}\pm0,02$	$0,13^{b}\pm0,004$
Fermentação 27h	$2,20^{b}\pm0,09$	$0,41^{a}\pm0,03$	$0,18^{ab}\pm0,02$

*Valores Médios dos açúcares identificados nas amostras de kefir. Os açúcares foram quantificados através da equação da reta construída a partir da injeção de padrões. Os valores estão expressos em g de açúcar/ 100g de amostra. *Médias seguidas de letras iguais não diferem significativamente entre si, a 5% de probabilidade (p>0,05), pelo teste de Tukey.

Fonte: Autor

Os resultados das análises físicas do kefir cremoso controle (KC), morango (KM), açaí (KA) e mix (KMIX) estão descritos na Tabela 2. As amostras para os parâmetros de pH apresentaram diferença significativa entre si, modificando levemente o pH do produto final. A adição da calda de fruta proporcionou a modificação do pH, devido a característica da acidez fruta. Ainda com essa variação os valores encontram-se dentro dos parâmetros estabelecidos pela legislação nº 46/2007 (BRASIL, 2007). O produto elaborado com uva, seguido do de morango foi o que apresentou menor pH.

Os valores de pH para as amostras encontram-se com valores próximos (4,43 a 4,8) ao encontrados em outros estudos com kefir (La Sinurat et al., 2019; Margareth et al., 2020; Vimercati et al., 2020). Estes valores são considerados satisfatórios em virtude de que valores menores proporcionam aumento da sinérese e consequentemente liberação de soro e consistência mais firmes do produto final.

Embora os níveis de pH do kefir sejam geralmente consistentes nas pesquisas, podem ocorrer variações devido a diferentes condições de fermentação, tipos de leite e culturas iniciais, refletindo uma interação complexa de fatores que afetam a acidez do produto final.

Quanto as análises de cor foram avaliadas as coordenadas de cromaticidades do espaço de cor no diagrama onde o L* indicando a luminosidade, a* positivo caracteriza-se por tonalidades próximas do vermelho, a* negativo tonalidades próximas do verde, b* positivo tonalidades amarelas e b* negativo tonalidades azuis, a variação com relação ao índice de saturação é dita por h°, onde os resultados estão descritos na Tabela 2.

Tabela 2: Parâmetros de pH e cor do kefir cremoso com diferentes polpas.

PARÂMETROS	FORMULAÇÕES DE KEFIR				
	KC	KM	KU	KA	KMIX
Ph	$4,84^{a}$ ±0,02	$4,38^{d}$±0,01	$4,23^{e}$±0,01	$4,77^{b}$±0,01	$4,45^{c}$±0,01
COR a*	$-2,62^{c}$±0,03	$6,27^{b}$±0,40	$7,95^{b}$±0,39	$51,19^{a}$±0,16	$7,98^{b}$±0,35
COR b*	$10,91^{a}$±0,7	$7,34^{b}$±0,39	$4,99^{c}$±0,11	$2,70^{d}$±0,28	$5,09^{c}$±0,01
COR L*	$96,23^{a}$±0,6	$80,18^{b}$±0,15	$71,32^{c}$±0,98	$51,19^{e}$±0,68	$55,73^{d}$±2,68
COR h°	$103,55^{a}$±1,08	$49,53^{b}$±0,67	$32,11^{c}$±1,32	$27,03^{d}$±2,55	$32,58^{c}$±1,36

*Valores tabelados médios dos parâmetros físicos. Médias seguidas de letras iguais não diferem significativamente entre si, a 1% de probabilidade (p>0,01), pelo teste de Tukey.

Fonte: Autor

Assim entendendo o espaço de cor, as formulações KM, KA e KC apresentaram diferenças entre si (p>0,01) devido a diferença de tonalidades e saturação, sendo a formulação KM caracterizado por uma cor variando entre o vermelho a* positivo e amarelo b* positivo. Esta variação indica pouca intensidade de cor quando comparado à característica da fruta in natura.

O KA no diagrama de cor encontra-se estável dentro do perímetro vermelho a* positivo. No estudo realizado por Nogueira et al. (2016), os autores avaliaram o parâmetro de cor quando adicionado açaí em bebida fermentado por kefir e não encontrou diferença significativa, relacionando ao baixo teor de acidez que influencia nas características sensoriais da amostra.

As amostras KU e KMIX não diferiram entre sim entre as coordenadas cromáticas a*, b* e h°, apresentando diferença (p>0,01), em relação as demais amostras KC, KM e KA, no h° que representa a angulação dessas cores no diagrama, com variações as cores destas

formulações mostram-se entre o vermelho a* positivo, porém considerando a angulação no diagrama, h°, estas formulações no diagrama de cor possuem uma tonalidade mais baixa apresentando assim menos intensidade e se aproximando de tons roxo.

A adição das caldas das frutas vermelhas influenciou a cor do leite fermentado onde a adição do açaí proporcionou maior intensidade do parâmetro a*, a amostra controle (sem adição de frutas) maior intensidade de b* e L* (amostra mais clara) e a calda de uva proporcionou menor valor de L* e consequentemente a amostra ficou mais escura.

A formulação KC diferiu estatisticamente entre todas as outras amostras o que era esperado diante que esta amostra era de leite fermentado natural, sem adição de nenhum tipo de calda, apenas resultado do processo de fermentação apresentando assim as características do leite quanto a cor. No perímetro do diagrama de cor observou-se uma variação para um branco com tom esverdeado, pois sua coordenada cromática a* é negativa e b positiva o que tende para o quadrante quatro do círculo aproximando-o com esta cor.

Quanto aos aspectos químicos foram avaliados os parâmetros de umidade, proteínas, lipídeos e cinzas da amostra de kefir controle. E o perfil de açúcares em todas as cinco formulações de kefir estudadas. Os resultados encontram-se descritos nas Tabela 3 e 4.

Avaliando os resultados pode-se observar que os parâmetros químicos de proteínas e lipídeos se encontram em concordância ao pré-determinado pela legislação brasileira. A legislação afirma que o nível de proteína dever ser superior a 2,9g/100g e lipídeos superiores a 6,0g/100g (Brasil, 2007).

Em relação ao teor de umidade, observa-se que é similar ao encontrado em produtos lácteos concentrados, como o iogurte grego (70%), que passa pelo mesmo processo de filtração do kefir cremoso do presente trabalho (Costa, 2019).

Tabela 3: Médias dos parâmetros químicos obtidos de Kefir cremoso controle.

AMOSTRA	COMPOSIÇÃO			
	UMIDADE	PROTEÍNA	LIPÍDEOS	CINZAS
Kerfir cremoso controle (KC)	77,27±2,88	8,66±0,38	20,71±0,61	0,59±0,18

Fonte: Autor

Avaliando o perfil de açúcares pode-se observar que foram detectados cinco açúcares (lactose, sacarose, glicose, galactose e frutose). Devido a eluição dificultada da lactose e sacarose, ambos forma expressos em soma.

Pode-se observar então que todas as amostras diferiram estatisticamente entre si devido a composição química dos açúcares que as caldas eram compostas. A amostra controle exibiu um teor de lactose de 1,49 (g/100g), portanto a diferença detectada da soma de lactose e sacarose nas demais formulações foi decorrente da sacarose presente na calda das frutas.

As amostras adicionadas de calda de morango, açaí e do mix exibiram maiores proporções de sacarose no produto. Entretanto, o kefir de uva apresentou menor quantidade de sacarose e maior proporção de glicose e frutose. A sacarose é um dissacarídeo composto por unidades de glicose e frutose, portanto estes valores detectados no perfil de açúcares do kefir de uva podem estar relacionados com a atuação

dos microrganismos presentes no kefir, que proporcionaram a hidrólise deste açúcar, mais rapidamente (Senedese, 2016). A maior proporção de frutose neste kefir será capaz de conferir um poder mais adocicado ao produto, devendo ser confirmada diante análise sensorial.

Tabela 4: Perfil de açúcares das formulações de Kefir cremoso.

PARÂMETROS	FORMULAÇÕES DE KEFIR				
	KC	KM	KU	KA	KMIX
Sacarose + Lactose	$1,49^{e}\pm0,01$	$8,12^{c}\pm0,05$	$6,45^{d}\pm0,10$	$8,79^{b}\pm0,06$	$10,87^{a}\pm0,04$
Glicose	$0,17^{a}\pm0,01$	$1,35^{b}\pm0,01$	$2,30^{a}\pm0,05$	$0,43^{c}\pm0,04$	$1,45^{b}\pm0,10$
Galactose	$0,24^{bc}\pm0,04$	$0,17^{c}\pm0,03$	$0,19^{c}\pm0,01$	$0,31^{b}\pm0,02$	$0,77^{a}\pm0,02$
Frutose	-	$0,73^{c}\pm0,01$	$1,65^{a}\pm0,02$	$0,23^{d}\pm0,02$	$1,00^{b}\pm0,02$

*Médias seguidas de letras iguais não diferem significativamente entre si, a 5% de probabilidade (p>0,05), pelo teste de Tukey.

Fonte: Autor

A análise aplicada ao estudo foi regida pelos parâmetros que a legislação preconiza para este tipo de produto onde visa avaliar as condições higiênico sanitárias do alimento a fim de mostrar a inocuidade e segurança do produto analisado.

Sendo realizada a análise para coliformes a 45ºC observou-se que todas as formulações estão de acordo com a RDC nº 12 do Regulamento Técnico sobre os Padrões Microbiológicos para Alimentos (BRASIL, 2001).

Importante ressaltar que existem estudos correlatando que os produtos resultantes do metabolismo da fermentação do grão de kefir principalmente das bactérias ácido láticas inibem o desenvolvimento dos microrganismos patógenos e indicadores, conferindo a este produto uma característica antimicrobiana (GARROTE et al. 2000).

4. CONCLUSÕES

O trabalho propõe um novo produto para os consumidores de leite fermentado obtidos a partir do kefir, com característica cremosa e com adição de frutas vermelhas como, morango, uva e açaí e sua mistura, resultando em um produto com características funcionais e maior qualidade nutricional.

Foi possível observar com base nos estudos analisados sobre kefir e comparando com o processamento executado neste trabalho que a fermentação estendida para 27 horas proporcionou ao produto resultados satisfatórios, que influenciaram na cremosidade final do produto. O kefir cremoso atendeu aos parâmetros exigidos pela legislação brasileira e a adição de calda de frutas vermelhas proporcionou modificações no perfil de açúcares.

REFERÊNCIAS

[1] APALOWO, O. E. et al. Nutritional characteristics, health impact, and applications of kefir. Foods, v. 13, n. 7, p. 1026, 2023.

[2] BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instrução normativa nº 46. Diário Oficial da União, Brasília, 2007.

[3] CHEN, C. et al. Influence of 4 lactic acid bacteria on the flavor profile of fermented apple juice. Food Bioscience, v. 27, p. 30-36, 2018.

[4] COSTA, M. F. et al. Impact of prebiotics on the rheological characteristics and volatile compounds of Greek yogurt. LWT, v. 105, p. 371-376, 2019.

[5] FERNÁNDEZ, P. D. et al. Fermentative properties of starter culture during manufacture of kefir with new prebiotics derived from lactulose. International Dairy Journal, v. 93, p. 22-29, 2019.

[6] FRANCIS, M. J. et al. Acoustic characterisation of pH dependent reversible micellar casein aggregation. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, v. 568, p. 259-265, 2019.

[7] LA SINURAT, R.; SUMARDI, S.; SALMAN, F. Karakteristik kefir susu sapi dengan inokulum ragi tape. Jurnal Ilmiah Peternakan Terpadu, v. 6, n. 2, p. 111-116, 2018.

[8] MARGARETH, L. L.; NURWANTORO, N.; RIZQIATI, H. Effect of different kefir grain starter concentration on yield, pH, CO2 content, and organoleptic properties of buffalo milk kefir. Journal of Applied Food Technology, v. 7, n. 1, p. 15-18, 2020.

[9] MOREIRA, S. J. et al. Avaliação do efeito de yacon em kefir sabor morango. Revista do Instituto Laticínios Cândido Tostes, v. 73, n. 2, p. 51-61, abr./jun. 2018.

[10] NOĞAY, N. H. Kefir beverage and its effects on health. Milk-Based Beverages, p. 273-296, 2019.

[11] NOGUEIRA, L. K. et al. Milk and açaí berry pulp improve sensorial acceptability of kefir-fermented milk beverage. Acta Amazonica, v. 46, n. 4, p. 417-424, 2016.

[12] PARK, Y. W. Goat milk. Chemistry and nutrition. Handbook of Milk of Non-Bovine Mammals, p. 34-58. Oxford: Blackwell Publishing, 2006.

[13] RICCI, A. et al. Volatile profile of elderberry juice: Effect of lactic acid fermentation using L. plantarum, L. rhamnosus and L. casei strains. Food Research International, v. 105, p. 412-422, 2018.

[14] SALEEM, K. et al. Nutritional and functional properties of kefir. International Journal of Food Properties, v. 26, n. 2, p. 3261-3274, 2023.

[15] SENEDESE, A. L. C. Desenvolvimento do processo de produção de L-ácido láctico obtido a partir da fermentação de açúcares: obtenção de dados cinéticos e avaliação de processos de separação. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Departamento de Desenvolvimento de Processos e Produtos, 2016.

[16] SHARMA, M. et al. The role of functional foods and nutraceuticals in disease prevention and health promotion. European Journal of Nutrition & Food Safety, v. 16, n. 2, p. 61-83, 2024.

[17] SINGH, P. K.; SHAH, N. P. Other fermented dairy products. Yogurt in Health and Disease Prevention, p. 87-106, 2017.

[18] VIGNESH, A. et al. A review on the influence of nutraceuticals and functional foods on health. Food Chemistry Advances, 2024.

[19] VIMERCATI, W. C. et al. Physicochemical, rheological, microbiological and sensory properties of newly developed coffee flavored kefir. LWT, v. 123, p. 109069, 2020.

[20] LV, M. et al. Effects of adding milk to fermented black mulberry (*Morus nigra* L.) juice on its antioxidant activity in C2C12 cells and changes in volatile flavor compounds during storage. Food Chemistry: X, v. 20, p. 101029, 2023.

[21] RAHAMAN, M. M. et al. Natural antioxidants from some fruits, seeds, foods, natural products, and associated health benefits: An update. Food Science & Nutrition, v. 11, n. 4, p. 1657-1670, 2023.

[22] LIMA, C.; ROSA, A. M. Behavior of the conversion of glucose, galactose and lactose to lactic acid by kefir grains. Journal of Biotechnology and Biodiversity, v. 11, n. 1, p. 30-38, 2023.

Capítulo 15

Uso da casca da jabuticaba como fonte de extração de antocianinas: aproveitamento de resíduos

Mateus Pereira de Macêdo[1]
Isabelly Marcela Araújo Pequeno[2]
Charlene Maria de Alcântara[3]
Francislaine Suelia dos Santos[4]
Josivanda Palmeira Gomes[5]

Resumo: O estudo aborda a extração de antocianinas da casca da jabuticaba (Myrciaria cauliflora), um fruto nativo do Brasil, cuja casca, frequentemente descartada, representa cerca de 20% do fruto e é rica em compostos com potencial antioxidante, como polifenóis e antocianinas. objetivo extrair antocianinas presentes na casca da jabuticaba aplicando diferentes métodos de estabilização do composto, avaliando-se a influência das condições aplicadas na copigmentação dos extratos obtidos e seu impacto na preservação das antocianinas. As análises foram realizadas tanto nas cascas in natura quanto em extratos alcoólicos, utilizando espectrofotometria para quantificar as antocianinas totais e avaliar parâmetros colorimétricos. A extração foi realizada variando pH (4,0 e 6,0) e temperatura (25°C e 75°C), e os dados foram analisados por meio de ANOVA em esquema fatorial 2x2. Os resultados mostraram que a interação entre pH e temperatura teve um impacto significativo na coloração e na extração das antocianinas, evidenciando a necessidade de otimização dessas condições para maximizar a extração. Os parâmetros colorimétricos, como luminosidade (L*), intensidade de vermelho (a*), intensidade de amarelo (b*), saturação da cor (C*) e ângulo de tonalidade (h*), foram determinados utilizando um espectrofotômetro portátil. Os resultados indicaram que as cascas apresentaram baixa luminosidade e tonalidades escuras, com a interação entre temperatura e pHmostrando significância estatística em alguns parâmetros. O estudo conclui que as cascas de jabuticaba podem ser uma fonte alternativa para a extração de corantes naturais, contribuindo para a indústria alimentícia e farmacológica, além de valorizar resíduos agroindustriais.

Palavras-chave: Myrciaria cauliflora, Antocianinas, corante natural.

[1] Estudante do Curso de Engenharia Agrícola- UAEA – UFCG
[2] Estudante do Curso de Engenharia Agrícola- UAEA – UFCG
[3] Doutoranda da pós-graduação de Engenharia de Processos – PPGEP – UFCG
[4] Docente/pesquisador do Departamento de Engenharia Agrícola- UAEA – UFCG
[5] Docente/pesquisador do Departamento de Engenharia Agrícola- UAEA – UFCG

1. INTRODUÇÃO

A jabuticaba (*Plinia cauliflora),* uma fruta típica do Brasil, tem se destacado não apenas pelo seu sabor único, mas também pelo seu perfil nutricional e potencial farmacêutico. A casca da jabuticaba, frequentemente descartada durante o processamento da fruta, possui uma alta concentração de antocianinas, que são pigmentos naturais com propriedades antioxidantes significativas. Esses compostos estão associados a vários benefícios à saúde, incluindo a redução do risco de doenças cardiovasculares e a proteção contra o câncer (Faria et al., 2016; Rodrigues et al., 2020).

As antocianinas têm atraído interesse crescente na indústria alimentícia e farmacêutica devido às suas propriedades funcionais e sensoriais. Estudos demonstram que a casca da jabuticaba contém níveis de antocianinas que podem ser superiores aos da polpa, o que a torna uma fonte valiosa para a extração de compostos bioativos (Gonçalves et al., 2021; Mello et al., 2022). Além disso, a valorização dos subprodutos da jabuticaba pode contribuir para a sustentabilidade, reduzindo o desperdício e promovendo a economia circular (Silva et al., 2023).

Diversas técnicas de extração têm sido aplicadas para isolar as antocianinas da casca, incluindo a extração por solvente, micro-ondas e ultrassom. Essas metodologias têm mostrado ser eficazes em aumentar o rendimento e a pureza dos compostos extraídos (González-Paramás et al., 2019). A aplicação de tecnologias inovadoras não só melhora a eficiência da extração, mas também potencializa o uso das antocianinas em produtos alimentícios, bebidas e suplementos nutricionais.

A crescente demanda por ingredientes naturais e saudáveis na indústria alimentícia e farmacêutica tem impulsionado o interesse na valorização de subprodutos agroindustriais, como a casca da jabuticaba. A utilização dessas cascas não apenas contribui para a sustentabilidade, reduzindo o desperdício, mas também promove a economia circular ao agregar valor a um resíduo que, de outra forma, seria descartado (Silva et al., 2023). Além disso, a extração de antocianinas da casca pode resultar em corantes naturais e aditivos alimentares, que são cada vez mais procurados por consumidores conscientes da saúde (Faria et al., 2016; Rodrigues et al., 2020).

Diversos estudos científicos demonstram os benefícios associados ao consumo de alimentos que contêm pigmentos naturais. Nesse cenário, a casca da jabuticaba se destaca como um resíduo abundante em antocianinas, que pode ser investigado e aprimorado para a extração de corantes naturais. Assim, a otimização dos métodos de extração surge como uma solução viável para a aplicação em larga escala desse aditivo, considerando que um dos principais obstáculos enfrentados pela indústria no uso de corantes naturais é a sua estabilidade durante o processamento e o armazenamento. Segundo (Inada et al., 2015), a utilização de subprodutos ricos em compostos bioativos, como a casca da jabuticaba, pode contribuir para a sustentabilidade na indústria alimentícia.

O trabalho teve como objetivo extrair antocianinas presentes na casca da jabuticaba aplicando diferentes métodos de estabilização do composto, avaliando- se a influência das condições aplicadas na copigmentação dos extratos obtidos e seu impacto na preservação das antocianinas. Além de determinar os parâmetros de cor e antocianinas das cascas in natura, desidratar as cascas da jabuticaba a 60°C até atingir o equilíbrio higroscópico, extrair as antocianinas presentes na casca da jabuticaba desidratada variando-se a faixa de pH e temperatura de processamento durante a concentração dos extratos, e, por fim, avaliar a influência das condições aplicadas na copigmentação dos extratos obtidos e seu impacto na preservação das antocianinas através da determinação

das antocianinas totais e parâmetros de cor (L*, a*, b*, C* e h°).

2. MATERIAIS E MÉTODOS (OU METODOLOGIA)

A pesquisa foi desenvolvida nos laboratórios da Unidade Acadêmica de Engenharia Agrícola, na Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), em Campina Grande, PB. A mesma apresentou viabilidade, pois todos os equipamentos e materiais de consumo necessários para a execução da pesquisa tem no referido laboratório e/ou nas dependências da UFCG, além deste estudo ter grande importância para reaproveitamento dos resíduos utilizados como matéria- prima.

As cascas da jabuticaba foram advindas de uma agroindústria da região responsável pelo o processamento da fruta para obtenção da polpa. As amostras foram transportadas para o Laboratório de Armazenamento e Processamento de Produtos Agrícolas (LAPPA) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), onde foram recepcionadas e selecionadas.

3. DESENVOLVIMENTO

A determinação de antocianinas totais foram realizadas de acordo com o método descrito por Francis (1982), onde foi dissolvido 0,1 g da amostra em 10 mL da solução extratora, etanol- HCL (1,5 N) na proporção 85:15, em ambiente escuro e deixados em repouso por 24h sob refrigeração. As leituras foram realizadas em espectrofotômetro a um comprimento de onda definido em 535 nm para absorbância.

Os parâmetros de cor foram determinados por leitura direta utilizando-se o espectrofotômetro portátil Hunter Lab Mini Scan XE Plus, modelo 4500 L, no sistema de cor Cielab, com padrão de iluminação D65/10° e calibrado com placa branca padrão (X = 80,5; Y = 85,3; Z = 90,0), conforme instruções do fabricante. Foram determinados os seguintes parâmetros: L* - luminosidade; a* - transição da cor verde (-a*) para o vermelho (+a*); e b* - transição da cor azul (-b*) para a cor amarela (+b*).

A partir dos valores de a* e b* foram calculados os valores de croma (C*) (Equação 1) e ângulo de tonalidade (h) (Equação 2):

$$C^* = \sqrt{(a^*)^2 + (b^*)^2} \qquad (1)$$

$$h = \tan^{-1} b^*/a^* \qquad (2)$$

Os extratos alcoólicos obtidos foram avaliados em triplicata quanto a determinação de antocianinas totais e parâmetros colorimétricos de acordo com as metodologias descritas nos itens antocianinas totais e cor.

Os dados experimentais da caracterizações in natura passaram pela análise descritiva. Os resultados obtidos nos extratos foram analisados através de uma análise variância - ANOVA em esquema fatorial 2 x 2, com 2 extratos (pH 4,0 e pH 6,0) e 2 temperaturas (25 e 75°C). Ambos utilizando-se o programa computacional ASSISTAT versão Assistat versão 7.7 beta (SILVA; AZEVEDO, 2016) para se verificar prováveis diferenças estatísticas entre os produtos.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos para a caracterização das cascas de jabuticaba in natura estão expressos na Tab. 1. Os valores de luminosidade (L*) como já era esperado, demonstrou que as cascas tem menos ausência de coloração com tonalidade escura e baixa luminosidade. As cascas tiveram valores baixos de intensidade e saturação de cor, com aspecto mais opacas. O ângulo de matriz (a* e b*) das cascas ficaram dentro do quadrante vermelho (0º) e amarelo (90º). A coloração além de ser um atributo visual muito importante para frutos, como no caso da jabuticaba, indica os componentes que estão presentes pigmentando principalmente as cascas dos frutos.

Tabela 1: Caracterização das cascas de *Plinia cauliflora* (jabuticaba) in natura.

Casca in natura		
Parâmetros	**Média**	**CV (%)**
L*	16,88 ± 0,72	4,28
a*	7,52 ± 1,34	17,83
b*	2,67 ± 0,44	16,42
C*	7,25 ± 0,31	4,22
hº	19,57 ± 0,98	5,01
Antocianinas totais (mg/100g)	2,88 ± 0,78	26,94

L* – luminosidade, a* – intensidade de vermelho, b* – intensidade de amarelo, C* – saturação da cor e h^0 – ângulo da tonalidade.

O conteúdo de antocianinas das cascas de jabuticaba pode variar conforme a espécie. Os autores Neves et al. (2021), ao estudarem a jabuticaba da espécie *Branca-vinho* peel, encontraram valor médio de 2.074 mg/100g de antocianinas, valores estes, que ficaram próximos do estudo analisado. Também, pode-se, ressaltar o estudo de extratos da casca de jabuticaba e sua aplicação na formulação de geléias que foram observadas pelos os autores Morais et al. (2023), com o acompanhamento de armazenamento e avaliação de degradação dos pigmentos e degradação das antocianinas. O estudo dos resíduos da jabuticaba e o uso das antocianinas na aplicação alimentícia vem sendo analisada cada vez mais pelo o meio científico e mais informações são coletadas sobre a estabilidade destes componentes e sua degradação.

Os resultados apresentados na Tab. 2, referem-se à caracterização dos extratos alcoólicos das cascas de jabuticaba, demonstrando as interações entre os parâmetros colorimétricos (L*, a*, b*, C* e h*) e o conteúdo de antocianinas em função da temperatura, do pH, bem como da interação entre eles.

Tabela 2: Caracterização dos extratos alcoólicos das cascas de *Plinia cauliflora* (jabuticaba).

Variáveis	Temperatura (T)	pH	TxpH	CV%
L	0,02 ns	8,26 *	6,02 *	4,13
a*	48,10**	1,00 ns	181,78**	6,77
b*	71,70**	88,52**	22,13**	7,97
C*	284,15**	2,94 ns	728,78**	3,11
h*	227,25**	175,61**	246,71**	8,66
Antocianinas totais (mg/100g)	707678,22**	892898,96**	1078580,62**	0,209

L* – luminosidade, a* – intensidade de vermelho, b* – intensidade de amarelo, C* – saturação da cor e h^0 – ângulo da tonalidade.

** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < 0,01$); * significativo ao nível de 5% de probabilidade ($0,01 < p < 0,05$); ^{NS} não significativo ($p \geq 0,05$).

Pode-se verificar que a interação entre temperatura e pH (TxpH) apresentou significância estatística em alguns parâmetros analisados, com níveis de 1% ou 5% de probabilidade. No entanto, nem todos os parâmetros apresentaram significância.. Observou-se que, no caso da luminosidade (L*), nas temperaturas de 25°C e 75°C, a reação não apresentou significância estatística. O mesmo foi observado para a intensidade do vermelho (a*) em relação ao pH e para o índice de cromaticidade (C*), sem reatividade significativa para os intervalos de pH 4 e 6. Por outro lado, o ângulo de tonalidade (h*) mostrou resultados significativos, indicando que a variação de temperatura e pH influenciou as tonalidades observadas nos extratos. Isso sugere que mudanças nessas condições podem modificar as nuances de cor dos extratos, com maior impacto nas interações entre os dois fatores.

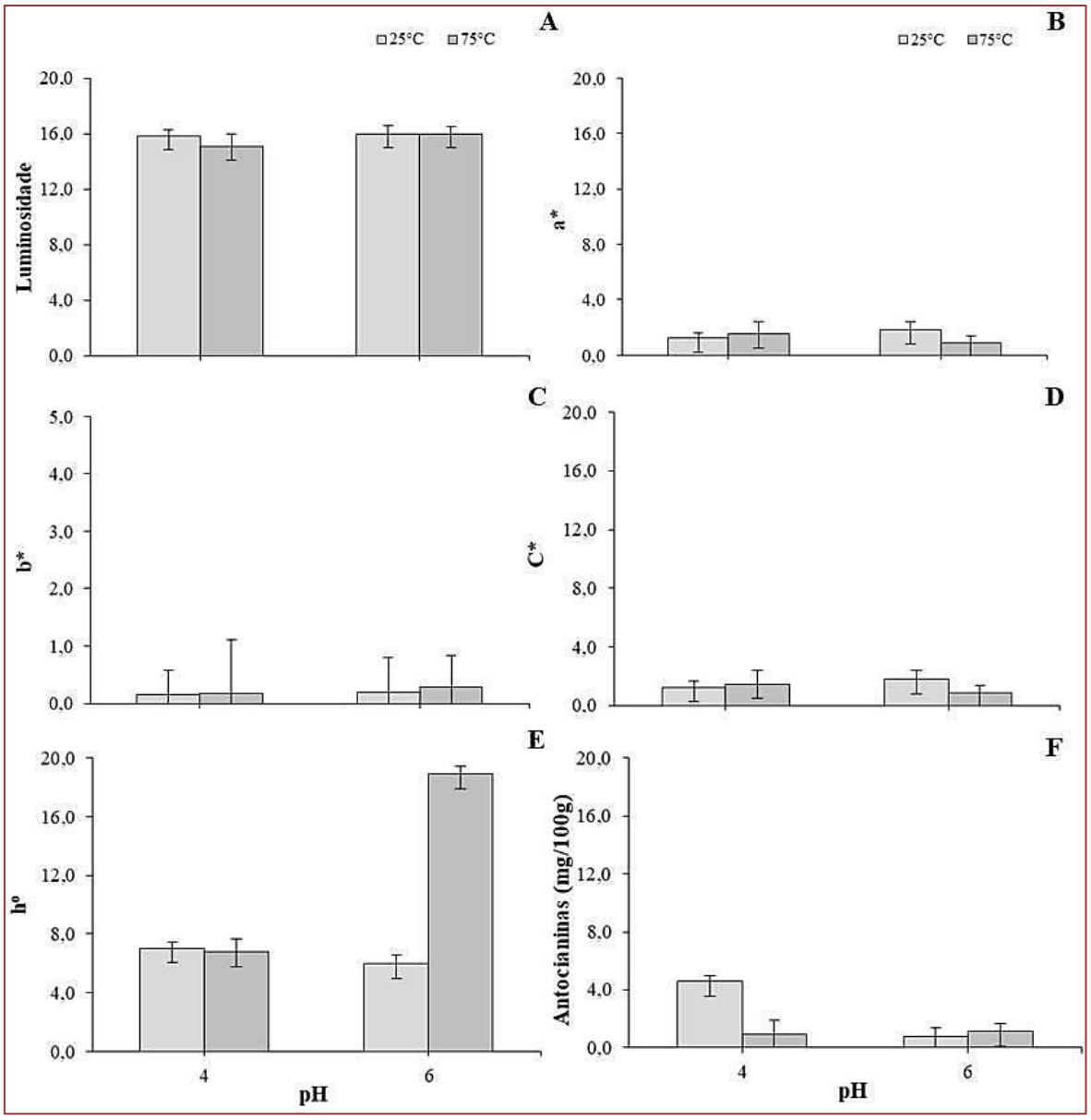
Com base nessas observações, estudos prévios indicam que a temperatura e o pH podem influenciar significativamente a estabilidade das antocianinas e, consequentemente, a colorimetria de extratos alcoólicos de vegetais. De acordo com Silva et al. (2018), a temperatura elevada tende a acelerar a degradação de antocianinas, o que pode resultar em perda de intensidade de cor e alteração do ângulo de tonalidade. Ademais, conforme discutido por Almeida (2021),o pH influencia diretamente o equilíbrio químico das antocianinas, alterando sua estrutura molecular e, consequentemente, a coloração. Entretanto, os efeitos isolados desses fatores podem ser mínimos, como observado no presente estudo. Em relação às antocianinas presentes nos extratos, estudos como os de Liu et al. (2018) confirmam que tanto a temperatura quanto o pH podem contribuir para a degradação dessas moléculas, o que foi corroborado pelos resultados obtidos.

Os resultados da Fig. 1, indicam que a coloração e a intensidade dos extratos variam significativamente com as condições de pH e temperatura. Por exemplo, a luminosidade (L*) pode refletir a opacidade e a intensidade da cor dos extratos, enquanto os valores de a* e b* ajudam a determinar a predominância de tonalidades vermelhas e amarelas, respectivamente. A saturação da cor (C*) e o ângulo de tonalidade (hº) fornecem uma visão mais detalhada sobre a vivacidade e a tonalidade específica dos extratos.

Além disso, a quantidade de antocianinas totais é um indicador crucial da qualidade dos extratos, pois essas substâncias são responsáveis pela coloração e possuem propriedades antioxidantes. A interação entre temperatura e pH, conforme mencionado,

pode ter um impacto significativo na extração e estabilidade das antocianinas, o que é essencial para aplicações em alimentos e bebidas.

Figura 1: L* – luminosidade (A), a* – intensidade de vermelho (B), b* – intensidade de amarelo (C), C* – saturação da cor (D), h^0 – ângulo da tonalidade (E) e antocianinas (F) dos extratos alcoólicos da casca de jabuticaba.



5. CONCLUSÃO

As cascas apresentam baixa luminosidade e opacidade, refletindo uma coloração predominantemente escura. A interação entre temperatura e pH exerce um papel crucial na extração e estabilidade das antocianinas dos extratos alcoólicos da casca de jabuticaba. Além disso, diversos parâmetros colorimétricos sugere que um controle rigoroso dessas variáveis durante o processo de extração é fundamental para maximizar a qualidade dos extratos. Conforme observado, a casca de jabuticaba, possui um potencial significativo como fonte de corantes naturais que pode ser usado na elaboração de produtos alimentício ou na composição de produtos farmacológicos.

REFERÊNCIAS

[1] ALMEIDA, C. dos S. O uso de indicadores ácido-base naturais no ensino de Química: uma revisão. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Licenciatura em Ciências: Biologia e Química) – Universidade Federal do Amazonas, Coari-AM, 2021.

[2] FARIA, A. F.; GONÇALVES, R. A.; RODRIGUES, S. F. Antioxidant properties of jabuticaba (Plinia cauliflora) extracts. Food Research International, v. 89, p. 221-227, 2016. DOI: 10.1016/j.foodres.2016.09.015.

[3] GONÇALVES, R. A.; SILVA, P. S.; MELLO, C. M. Characterization of bioactive compounds in jabuticaba skins. Journal of Food Science and Technology, v. 58, n. 7, p. 2630-2637, 2021. DOI: 10.1007/s11483-020-02629-x.

[4] GONZÁLEZ-PARAMÁS, A. M.; PÉREZ-ALONS, O.; CARO, I. Natural pigments: Their

[5] applications and benefits in the food industry. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, v. 59, n. 2, p. 239-256, 2019. DOI: 10.1080/10408398.2017.1401430.

[6] INADA, A. M.; SILVA, D. L.; CUNHA, L. M. Utilização de subprodutos ricos em compostos bioativos na indústria alimentícia: uma abordagem sustentável. Revista Brasileira de Tecnologia de Alimentos, v. 12, n. 3, p. 123-135, 2015.

[7] LIU, Y. et al. Stability of anthocyanins in blueberry juice: Effects of temperature and pH. Food Chemistry, v. 245, p. 1-8, 2018.

[8] MELLO, C. M.; RODRIGUES, S. F.; FARIA, A. F. Sustainability in the jabuticaba processing: Utilization of by-products. Waste Management, v. 132, p. 230-239, 2022. DOI: 10.1016/j.wasman.2021.12.020.

[9] NEVES, Natália de Andrade; STRINGHETA, Paulo César; GÓMEZ-ALONSO, Sérgio; SILVA, Isadora Ferreira da; GARCÍA-ROMERO, Esteban; HERMOSÍN-GUTIÉRREZ, Isidro. Identificação e quantificação da composição fenólica de diferentes espécies de Jabuticaba (Plinia spp.) por HPLC-DAD-ESI/MSn. Química de Alimentos, v. 355, p. 129605, 2021.

[10] RODRIGUES, S. F.; SILVA, P. S.; GONÇALVES, R. A. Antioxidant activity of jabuticaba extracts: Implications for health and industry. Food Chemistry, v. 309, p. 125647, 2020. DOI: 10.1016/j.foodchem.2019.125647.

[11] SILVA, F. de A. S.; AZEVEDO, C. A. V. de. The Assistat Software Version 7.7 and its use in the analysis of experimental data. African Journal Agriculture Research, v.11, n.39, p.3733- 3740, 2016.

[12] SILVA, H. C. S. da. Efeitos na coloração, atividade antioxidante e composição fenólica no suco de uva (Vitis Labrusca L.), enriquecido de termomaceração dos subprodutos de prensagem. 2018. 72 f. Dissertação (Mestrado em Nutrição e Alimentos) - Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2018.

[13] SILVA, P. S.; GONÇALVES, R. A.; MELLO, C. M. Extraction techniques for bioactive compounds from jabuticaba: A review. Journal of Food Engineering, v. 322, p. 110924, 2023. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2022.110924.

Capítulo 16

Produção de amilases por Aspergillus sp. FSDE16 e hidrólise enzimática da casca de mandioca

Tatiany Gonçalves Lisboa[1]
Mikael Angelo Martins Souza[1]
Laís Campos Teixeira de Carvalho Gonçalves[2]

Resumo: As amilases são enzimas fundamentais na indústria, representando 30% do mercado global de enzimas, devido à sua capacidade de hidrolisar amido em glicose e oligossacarídeos. O amido, principal carboidrato de reserva vegetal, é amplamente utilizado, especialmente em biocombustíveis, onde a demanda tem crescido em resposta a preocupações ambientais. Desta forma, o presente estudo teve como objetivo avaliar a produção de amilases pelo *Aspergillus sp. FSDE16* durante a fermentação sólida da casca de mandioca. Após 168 horas de fermentação, a maior atividade de alfa-amilolases foi observada em 72 horas, com 22,7 U/g. A hidrólise enzimática da casca da mandioca resultou em um aumento significativo de açúcares redutores, em mais de 10 vezes do valor inicial, demonstrando o alto potencial das amilases produzidas em hidrolisar o amido. Assim, o fungo *Aspergillus sp. FSDE16* mostrou potencial para a produção de amilases de baixo custo, favorecendo a conversão de amido em açúcares fermentáveis, essenciais para a produção de etanol de segunda geração.

Palavras-chave: Amilase, hidrólise enzimática, casca de mandioca.

[1] Aluno de graduação em Tecnologia Sucroalcooleira da Universidade Federal da Paraíba (UFPB).
[2] Profª Dra no Departamento de Tecnologia Sucroalcooleira da Universidade Federal da Paraíba (UFPB).

1. INTRODUÇÃO

Entre as enzimas utilizadas na indústria, as amilases possuem uma longa trajetória de sucesso e, atualmente, representam 30% do mercado global de enzimas. Isso ocorre porque as amilases hidrolisam as ligações glicosídicas do amido, liberando glicose, maltose e cadeias curtas de oligossacarídeos (PAUL et al., 2021). O amido é um polissacarídeo constituído por unidades de D-glicose conectadas por ligações glicosídicas, formando amilose e amilopectina. Por ser a principal fonte de carboidrato de reserva no reino vegetal, é amplamente utilizado pela indústria (IUGA; MIRONEASA, 2019; SEUNG, 2020).

A produção de enzimas a partir de fungos filamentosos apresenta vantagens em diversas aplicações biotecnológicas. Eles têm demonstrado capacidade de hidrolisar subprodutos agrícolas de forma eficaz, produzindo produtos de alto valor agregado por meio da fermentação em estado sólido (FES). Além disso, muitos complexos enzimáticos secretados pelos fungos possuem características favoráveis à indústria, como termotolerância e estabilidade em diferentes pH (MONDEL et al., 2022; MEYER, 2020; TROIANO; DUMONT, 2020).

O uso de amilases como biocatalisadores do amido oferece diversas vantagens, como alta especificidade, promoção da bioeconomia, menor impacto ambiental e redução da dependência de catalisadores químicos na indústria (ABEDI et al, 2024; SEUNG, 2020; PAUL et al., 2021; MONDEL et al., 2022). Assim, as amilases são aplicadas em vários setores industriais, com destaque para a indústria de biocombustíveis, que tem experimentado um crescimento significativo devido ao elevado consumo de combustíveis fósseis e seus impactos ambientais (LÄUFER, 2019; MESBAH, 2022; TROIANO et al., 2020). Segundo avaliações do comércio de enzimas, as α-amilases alcançaram um valor de US$ 274,1 milhões no mercado global em 2019, com expectativa de crescimento para US$ 382,4 milhões até 2025 (MONDEL et al., 2022).

As amilases são amplamente usadas na indústria alimentícia (CRIPWELL; ZYL; VILJOEN-BLOOM, 2021; MESBAH, 2022). Nos detergentes, as amilases presentes na composição facilitam a lavagem de roupas delicadas e com manchas de molhos, cremes e chocolate, além de serem ambientalmente mais seguros. Por isso, 90% dos detergentes líquidos produzidos nos dias de hoje contêm α-amilase termoestáveis e de pH alcalino (MESBAH, 2022;). Na área farmacêutica, as amilases têm se destacado com atividades antimicrobiana e antibiofilme (EL-GENDI, 2022).

Por fim, a amilase tem grande aplicação na produção de etanol de primeira geração, hidrolisando amido presente em diferentes biomassas, como o milho, produzindo açúcares fermentescíveis, que são fermentados por leveduras, liberando bioetanol (LÄUFER, 2019). Nesta perspectiva, o objetivo deste estudo foi avaliar a produção de amilases pelo fungo *Aspergillus* sp. FSDE16 em fermentação sólida e promover a hidrólise enzimática da casca de mandioca.

As amilases desempenham um papel fundamental na indústria, representando cerca de 30% do mercado global de enzimas devido à sua capacidade de hidrolisar amido, transformando-o em açúcares como glicose e maltose (PAUL et al., 2021). Por serem extraídas de fungos filamentosos, essas enzimas apresentam alta termotolerância e estabilidade em pH variado, o que facilita sua aplicação em setores como o de biocombustíveis e alimentos (MONDEL et al., 2022; MEYER, 2020). No setor de biocombustíveis, por exemplo, a α-amilase é usada para hidrolisar amido de milho,

liberando açúcares fermentescíveis para a produção de bioetanol, contribuindo para a redução de combustíveis fósseis (LÄUFER, 2019; TROIANO et al., 2020).

A aplicação das amilases também se destaca na indústria farmacêutica, pois demonstram atividades antimicrobianas, contribuindo para o desenvolvimento de produtos com propriedades antibiofilme (EL-GENDI, 2022), e em detergentes, facilitando a remoção de manchas de alimentos e sendo ambientalmente seguras, o que explica seu uso em 90% dos detergentes líquidos (MESBAH, 2022). Este estudo, portanto, avalia a produção de amilases pelo fungo Aspergillus sp. FSDE16 em fermentação sólida, visando hidrolisar amido da casca de mandioca para potenciais aplicações industriais.

2. MATERIAL E MÉTODOS

As cascas de mandioca foram obtidas de feiras livres no município de João Pessoa-PB. Em seguida, foram lavadas, cortadas e secadas em estufa, em média de 24 a 72h. Em seguida, foi realizada a moagem e peneiramento, respectivamente, para obtenção do resíduo em granulometrias de mesh 16, mesh 20, mesh 30, mesh 40 e mesh 50, sendo utilizada a fração da mistura do mesh 20 e 30 para fermentação sólida.

O fungo *Aspergillus* sp. FSDE16, que faz parte da coleção de microrganismos do Laboratório de Biotecnologia e Bioprocessos (LABIP – CTDR, UFPB), foi plaqueado em meio PDA (*Potato Dextrose Agar*) e mantido em estufa a 37ºC por 7 dias.

Em seguida, foram pesados 100g de casca de mandioca. A biomassa foi umedecida com água destilada para apresentar 50% de umidade, conforme a equação 1 abaixo: Equação 1:

$$m_a = m_r * \frac{u_d - u_r}{1 - u_d}$$

Onde:

ma = massa de água;

mr = massa do resíduo;

ud = umidade desejada;

ur = umidade do resíduo.

A biomassa umedecida foi transferida para *erlenmeyer*s de 1000mL, em triplicata. Os meios foram esterilizados em autoclave durante 15 minutos à 121°C. Em seguida, foi realizada a inoculação dos esporos na concentração de 10^7 esporos/g, conforme Carvalho-Gonçalves 2017.

A cada 24h, 5g do cultivo foi retirado e homogeneizado com água destilada na proporção de 1:12 (g/mL), por 1h, em temperatura ambiente. Em seguida, a amostra foi filtrada e centrifugada a 5000 rpm por 3 minutos (Carvalho-Gonçalves 2017). O sobrenadante foi mantido a -20 ºC até a realização das análises. As amostras foram retiradas nos tempos de 72, 96, 120, 144 e 168h.

Para a análise da atividade enzimática de amilase foi seguido o método proposto por Aleixo Júnior (2018) com adaptações. Em microtubos, adicionou-se 0,25 uL de amido solúvel 1%(m/v) e 0,25 uL de tampão citrato de sódio pH 5,0, e em seguida adicionou-se

0,25 uL de do sobrenadante, a mistura foi homogeneizada e a reação ocorreu por 10 minutos à 50°C. Para o branco da amostra, em um microtubo foram adicionados 0,25 uL de tampão citrato, 0,25 uL do sobrenadante do extrato enzimático e 0,5uL de solução de DNS. O branco do espectrofotômetro foi preparado adicionando 0,5 uL de tampão citrato e 0,5 uL de solução de DNS em um tubo de ensaio. Todas as análises foram feitas em triplicata. A concentração de açúcares redutores foi determinada pelo método do DNS. Fez-se a leitura a 540 nm usando solução de glicose como padrão (MILLER, 1959). O valor da atividade enzimática foi calculado através da Equação 2:

$$Amilase\left({}^{U}/_{g}\right) = \frac{((A-B)\times f\times d\times V\times R)}{0{,}18\times t\times V_e}$$

Onde:

A = absorbância da amostra;

B = absorbância do branco da amostra;

f = fator de conversão da curva de calibração (mg/mL);

d = diluição da amostra;

V = volume total do meio de reação (mL);

0,18 = fator de conversão de miligramas para µmol de glicose;

t = tempo de reação (min);

Ve = volume da enzima no meio de reação (mL);

R = razão volume de solvente por grama de meio cultivado (mL/g).

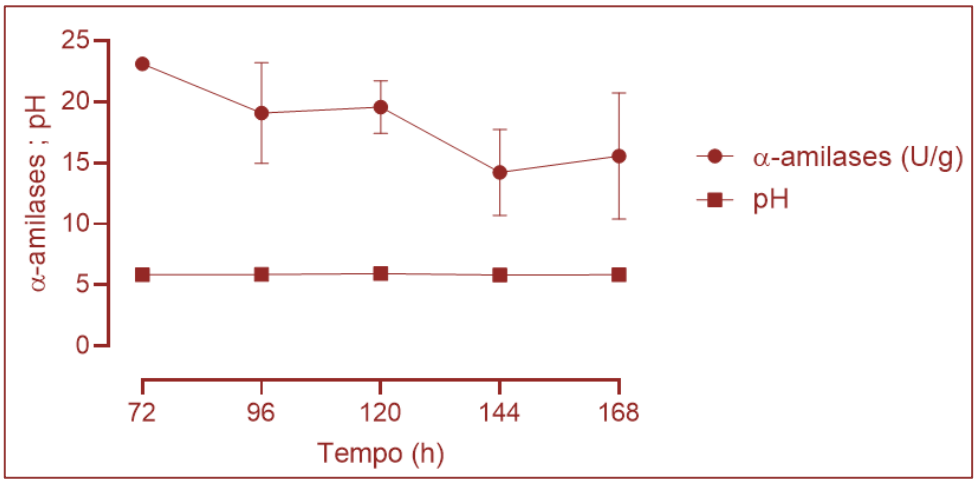
Para realização da hidrólise enzimática, 5g de casca de mandioca de 50 mesh foram adicionados em erlenmeyers de 1250 mL. Em seguida, adicionou-se a enzima amilase, na concentração de 2 U/mL e o tampão citrato (50 mM , pH 4,8) até completar 50 mL de volume final de reação. A hidrólise ocorreu em *shaker*, por 72h, a 50 ºC e 150 rpm. Os açúcares redutores (AR) foram analisados de acordo com a metodologia proposta por Miller (1959).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após avaliar a fermentação sólida da casca de mandioca, observamos que a maior produção de alfa-amilase foi em 72h de fermentação, com 22,7 U/g. Em relação ao pH do meio, ele se manteve em torno de 5,8, ao longo de todos os dias analisados.

A casca de mandioca é um dos resíduos gerados na produção da farinha de mandioca, sendo constituído da casca, entrecasca e pontas de mandioca, apresentando elevador teor de umidade (KONOPKA, 2018). A casca possui em sua composição uma média de 30% de amido, 5% de açúcares, 11% de lignina, 5% de proteínas, 4% de minerais e pequenas quantidades de pectina, carboxil, hidroxila e aminogrupos (AJALA et al., 2020).

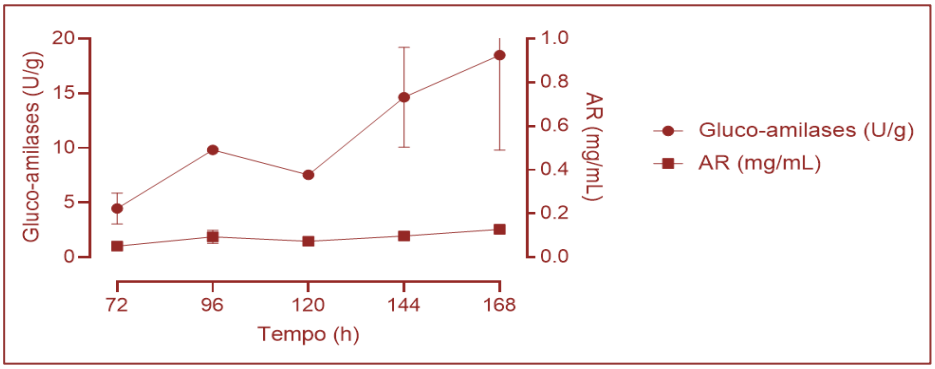
Figura 1 – Atividade de alfa-amilase e pH durante a fermentação sólida da casca de mandioca



Quanto à atividade de gluco-amilases, podemos perceber que a maior atividade ocorreu em 144h, com 17,86 U/g (Figura 2). A maior liberação de AR ocorreu em 168h de fermentação, com 2,59 mg/mL (Figura 2).

Kalaiarasi e Parvatham (2015) avaliaram a produção de amilases pelo fungo *Aspergillus awamori* MTCC 9997 em meio contendo casca de mandioca em pó, com umidade ajustada para 70% e temperatura de 28°C, e obtiveram resultado de atividade enzimática de 18,2 U/g em 120h de cultivo.

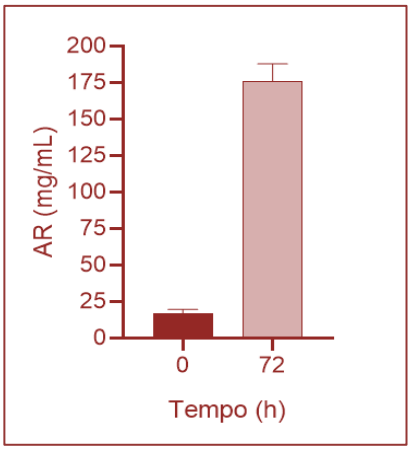
Figura 2 – Atividade de gluco-amilases e açúcares redutores durante a fermentação sólida da casca de mandioca



Para analisar o potencial de hidrólise da casca de mandioca, pelas amilases produzidas pelo fungo *Aspergillus* sp. FSDE16, foram analisados os AR no tempo 0 e após 72h de reação. Desta forma, de acordo com a Figura 3, podemos observar que no tempo 0, a concentração de AR era de 16,79 mg/mL e após 72h, a quantidade de AR foi de 176,28 mg/mL.

Saekhow et al. (2020) estudaram a hidrólise enzimática do caule da mandioca utilizando a combinação das enzimas comerciais Termamyl e AMG, com carga enzimática de 1,2 U/g e 3,5, respectivamente, pH 7,0 e temperatura de 60°C, e obtiveram a concentração de AR de 12 mg/mL em 48h.

Figura 3 – Hidrólise enzimática da casca de mandioca pelas amilases produzidas por *Aspergillus* sp. FSDE16



Pereira et al. (2017) em seu estudo sobre avaliação da hidrólise enzimática do amido de batata doce com amilases produzidas por *Aspergillus niger*, carga enzimática de 22,50 U/g, pH 5,0 e temperatura de 55°C, em 26h obteviveram concentração de 17,5 mg/mL.

Nesta perspectiva, podemos perceber o potencial hidrolítico das amilases obtidas neste estudo, visando a quebra do amido para liberação de açúcares e fermentação alcoólica para produção de etanol 2G.

4. CONCLUSÃO

O fungo *Aspergillus* sp. FSDE16 demonstrou produzir amilases, com bom potencial de hidrólise de amido e de baixo custo, em um meio contendo apenas um resíduo agroindustrial, a casca de mandioca. A alta obtenção de açúcares fermentescíveis, por meio do processo de hidrólise enzimática da casca de mandioca, apresenta um grande potencial para fermentação desses carboidratos para produção de etanol de segunda geração.

REFERÊNCIAS

[1] ABEDI, E.; KAVEH, S.; HASHEMI, S. M. B. Structure-based modification of a-amylase by conventional and emerging technologies: Comparative study on the secondary structure, activity, thermal stability and amylolysis efficiency. *Food Chemistry*, v. 437, p. 137903, 2024.

[2] AJALA, E. O.; AJALA, M. A.; TIJANI, I. A.; ADEMOLA, A. A.; SURU, I. S. Kinetics modelling of acid hydrolysis of cassava (*Manihot esculanta Cranz*) peel and ITS hydrolysate chemical characterisation. Journal of King Saud University. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jksus.2020.03.003, 2020.

[3] CARVALHO-GONÇALVES, L. C. T. Bioprospecção de fungos celulolíticos provenientes da agroindústria para produção de bioetanol. 201 p. Tese (Doutorado em Biotecnologia) – Programa de Pós-Graduação da Rede Nordeste de Biotecnologia, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2017.

[4] CRIPWELL, R. A.; VAN ZYL, W. H.; VILJOEN BLOOM, M. Fungal Biotechnology: Fungal Amylases and Their Applications. In: ZARAGOZA, Ó.; CASADEVALL, A. (Ed.). *Encyclopedia of Mycology*. Oxford: Elsevier, p. 326-336, 2021.

[5] EL GENDI, H.; SALEH, A. K.; BADIERAH, A. A Comprehensive Insight into Fungal Enzymes: Structure, Classification, and Their Role in Mankind's Challenges. *J. Fungi*, v. 8, n. 1, p. 23, 2022.

[6] ENEZ, B. Purification and Characterization of Thermostable α-Amylase from Soil Bacterium *Bacillus* sp. *Protein & Peptide Letters*, v. 28, p. 1372-1378, 2021.

[7] IUGA, M.; MIRONEASA, S. A review of the hydrothermal treatments impact on starch-based systems properties. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, v. 60, n. 22, p. 3890-3915, 2020.

[8] JAIN, D.; KATYALL, P. Optimization of gluco-amylase production from *Aspergillus* spp. for its use in saccharification of liquefied corn starch. *3 Biotech*, v. 8, n. 101, 2018.

[9] KALAIARASI, K.; PARVATHAM, R. Optimization of process parameters for -amylase production under solid-state fermentation by Aspergillus awamori MTCC 9997. Journal of Scientific & Industrial Research, v. 74, p. 286 – 289, 2015.

[10] KONOPKA, D. N. Avaliação nutricional de resíduos de casca de mandioca fermentados por *Yarrowia Lipolytica.* Laranjeiras do sul, 50 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Engenharia de Alimentos) – Departamento de Engenharia de Alimentos, Universidade Federal da Fronteira Sul, Laranjeiras do Sul, 2018.

[11] LÄUFER, A. Starch Biorefinery Enzymes. *Advances in Biochemical Engineering/Biotechnology*, v. 166, p. 137-152, 2019.

[12] LI, Z.; CAI, L.; GU, Z.; SHI, Y. C. Effects of Granule Swelling on Starch Saccharification by Granular Starch Hydrolyzing Enzyme. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, v. 62, p. 8114-8119, 2014.

[13] MESBAH, N. M. Industrial Biotechnology Based on Enzymes From Extreme Environments. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, v. 10, 2022.

[14] MEYER, V.; et al. Growing a circular economy with fungal biotechnology: a white paper. *Fungal Biology and Biotechnology*, v. 7, p. 5, 2020.

[15] MILLER, G. L. Use of dinitro salicylic acid reagent for determination of reducing sugar. Analytical Chemistry, v. 31, n. 3, p. 426-428, 1959.

[16] MONDAL, S.; MONDAL, K.; HALDER, S. K.; THAKUR, N.; MONDAL, K. C. Microbial Amylase: Old but still at the forefront of all major industrial enzymes. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, v. 45, 2022.

[17] PAUL, J. S.; et al. Aspects and recent trends in microbial α-amylase: a review. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, v. 193, n. 8, p. 2649-2698, 2021.

[18] PERVEZ, S.; AMAN, A.; IQBAL, S.; SIDDIQUI, N.; QADER, S. A. U. Saccharification and liquefaction of cassava starch: an alternative source for the production of bioethanol using amylolytic enzymes by double fermentation process. *BMC Biotechnology*, v. 14, n. 49, 2014.

[19] SEUNG, D. J. N. P. Amylose in starch: Towards an understanding of biosynthesis, structure, and function. *New Phytologist*, v. 228, n. 5, p. 1490-1504, 2020.

[20] TROIANO, D.; ORSAT, V.; DUMONT, M. J. R. Status of filamentous fungi in integrated biorefineries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 117, 2020.

Capítulo 17

Hidrogênio verde: revolucionando o futuro da energia limpa

Lucas Manuel Gomes dos Santos[1]
Débora Rafaelly Soares[2]
Fabiana Pimentel Macêdo Farias[3]

Resumo: Diversos países têm buscado alternativas energéticas mais limpas e renováveis, devido a mudanças na geopolítica internacional. O hidrogênio verde (H2V) se destaca como uma opção promissora para substituir combustíveis fósseis, reduzindo emissões de gases de efeito estufa e sendo aplicável em setores como comércio, indústria e mobilidade. Países como China, Estados Unidos e Brasil, este último com recursos naturais e clima favorável, têm se interessado pela produção de H2V. No entanto, desafios industriais, logísticos e de investimento precisam ser superados para consolidar o hidrogênio verde como uma fonte global de energia limpa, contribuindo para a transição energética e para a geopolítica moderna.

Palavras–chave: Energia Renovável; H2V; Matriz Energética.

[1] Estudante do Curso de Engenharia de Biossistemas - CDSA - UFCG
[2] Docente da UATEC - CDSA - UFCG
[3] Docente da UATEC - CDSA - UFCG

1. INTRODUÇÃO

O petróleo desempenha um papel central nas relações geopolíticas e na economia moderna desde a era industrial. No entanto, com sua escassez crescente, há uma reavaliação dessa dependência, impulsionando investimentos em energias alternativas, como bioenergias, nuclear e hidrogênio. Conforme o relatório da IEA de 2024, os investimentos globais em tecnologias de energia limpa devem alcançar US$ 2 trilhões, embora países emergentes enfrentem dificuldades financeiras para acompanhar esse ritmo.

Apesar dos progressos, os investimentos em países como Brasil, China e Índia representam apenas 15% do total global, aquém do necessário para atender à crescente demanda. Energias renováveis como solar, eólica e hidroelétrica continuam a avançar, com destaque recente para o hidrogênio verde. Essa fonte, antes produzida com combustíveis fósseis, agora usa energia solar, o que a torna mais limpa e promissora, especialmente na China, que busca acelerar sua transição energética (BORGES, 2022).

A produção de hidrogênio requer poucos componentes, como água e sais minerais, sendo realizada em um eletrolizador, onde eletrodos catalisam a reação para gerar hidrogênio (HOLLER, 1988). Apesar de seu processo ser relativamente simples, o hidrogênio verde enfrenta desafios para ganhar escala no mercado, principalmente devido ao alto custo de produção e dificuldades no armazenamento, já que no estado líquido requer -253°C e, no gasoso, tem baixa densidade, tornando-o difícil de conter (BORGES, 2022).

Outros obstáculos incluem exigências técnicas rigorosas, como alta pressão e corrosão nos sistemas de produção, além da falta de experiência dos técnicos. Esses fatores dificultam a expansão do hidrogênio como matriz energética global. Entretanto, o hidrogênio verde é considerado uma alternativa promissora para a transição energética e a mitigação das mudanças climáticas, além de ser estratégico para fortalecer as relações geopolíticas futuras (CPG, 2022). Diante do exposto, o trabalho propõe uma revisão literária para promover o hidrogênio verde como solução, destacando a necessidade de mais investimentos em tecnologia e infraestrutura para viabilizar sua adoção em larga escala.

2. HIDROGÊNIO VERDE

O hidrogênio é o elemento químico mais abundante no universo, representando 90% da massa de toda matéria. Ele é um gás incolor, inodoro, insípido e inflamável, com a maior quantidade de energia por unidade de massa (142 MJ/kg), superando combustíveis fósseis, como o gás natural (SOARES, 2019). Pode ser extraído de fontes naturais por diversos métodos, como fotônicos, elétricos, químicos e bioenergéticos (EL-EMAM e ÖZCAM, 2019). Dependendo de sua origem, o hidrogênio é classificado por cores: cinza, azul, marrom, turquesa e verde. O hidrogênio verde, produzido a partir de energias renováveis, é o único totalmente livre de emissões de CO_2, sendo uma fonte de energia limpa e sustentável (OSMAN, 2021).

O hidrogênio verde é produzido a partir de energias renováveis, como solar e eólica, sem gerar CO_2. Especialistas acreditam que ele pode desempenhar um papel crucial na redução das emissões de CO_2 em diversos setores industriais, contribuindo de forma significativa para a mitigação das mudanças climáticas (LARA e RICHTER, 2023).

O Quadro 1 abaixo exemplifica diferentes rotas de produção e suas respectivas eficiências na produção de hidrogênio:

Quadro 1 - Diferentes formas de produção do gás de hidrogênio.

Matéria-prima	Método de produção	Eficiência energética	Fonte
Água	Eletrolise alcalina	61-82%	Parra *et al.* (2019)
Biomassa	Termólise via pirólise	35-50%	Dawood, Anda e Shafiullah (2020)
Biomassa	Termólise via gaseificação	35-50%	El-Emam e Özcan (2020)
Carvão	Termólise via gaseificação	74-85%	Mah *et al.* (2019)
Hidrocarbonetos	Processo de oxidação parcial de combustíveis fósseis	60-75%	Pinsky *et al.* (2020)
Gás natural	Reforma do metano a vapor	74-85%	Pinsky *et al.* (2020)

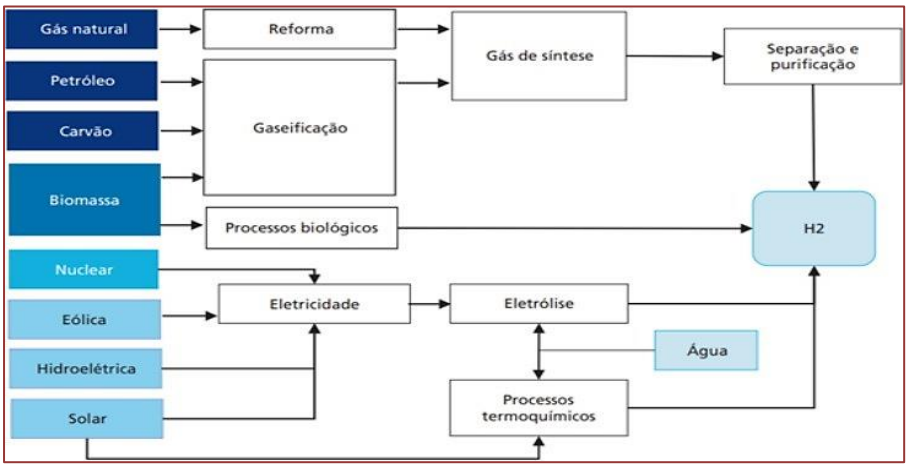
Fonte: LARA e RITCHER, 2023

Atualmente, cerca de 96% do hidrogênio mundial é produzido a partir de combustíveis fósseis, totalizando 120 milhões de toneladas. Embora o hidrogênio verde seja uma alternativa atraente, ele ainda é mais caro que o produzido a partir de carvão e gás natural (PAIVA, 2022). No entanto, a IRENA (2020) prevê que, nas próximas décadas, os custos do hidrogênio verde devem diminuir devido à fabricação mais acessível de eletrolisadores e à queda nos preços das energias renováveis, tornando-o mais competitivo.

3. PROCESSOS DE PRODUÇÃO DO HIDROGÊNIO VERDE

A produção de hidrogênio verde pode ocorrer por duas fontes principais: biomassa usada em processos como gaseificação, pirólise, liquefação, hidrólise, entre outros; pela eletrólise da água, pela reforma do gás natural, entre outros processos, que podem ser vistos na Figura 1.

Figura 1 - Diferentes processos para produção de hidrogênio.



Fonte: IPEA (2022).

3.1. ELETRÓLISE DA ÁGUA

A eletrólise da água é a forma mais popular de se produzir hidrogênio hoje em dia é amplamente adotada pela indústria. Consiste num processo eletroquímico de quebra da molécula de água em seus dois componentes, hidrogênio e oxigênio, ocasionado por uma corrente elétrica que passa na pela água. Existe um equipamento idealizado apenas para otimizar este processo, chamado eletrolisador, onde são distribuídos eletrodos (cátodos e ânodos), e para catalisar a reação, pode ser adicionado algum tipo de sal (NaCl, KOH, entre outros) na água para agir como condutor iônico (COSTA, 2009).

Este conjunto de água e sal é chamado de fluido eletrolítico e, em conjunto com os eletrodos, são chamados de "células". Um eletrolisador é formado por várias células e, a medida que são emitidas as cargas elétricas, se acumula o hidrogênio no cátodo e o oxigênio no ânodo em forma de bolhas que sobem a superfície do líquido e podem ser coletadas. Para evitar que os gases se misturem novamente e formem água, é adicionado uma membrana entre os polos elétricos (SOUSA, 2013).

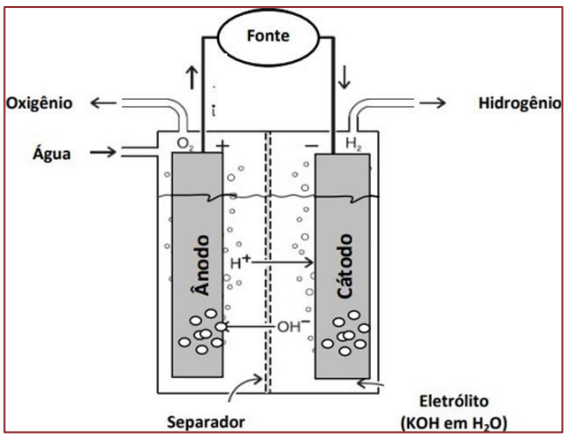
A Figura 2 representa um sistema relativamente simples que precisa apenas da fonte de energia, que se for renovável, já passa a ser considerada uma produção de hidrogênio verde.

Outra vantagem é a sua eficiência: se comparado a energia utilizada versus o valor energético produzido em hidrogênio, a eficiência flutua entre 80 a 94% (KRUSE, 2002), sendo influenciada apenas pela pureza e porcentagem de massa seca de hidrogênio.

3.2. REFORMA DA BIOMASSA

Por definição da ANEEL (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2020), biomassa "é a massa utilizada para produção de energia, a partir da decomposição de organismos vivos, que pode ser de origem vegetal ou animal, como resto de alimentos, madeira, entre outros". A biomassa pode ser uma fonte de energia direta usada na queima de caldeiras ou fornos o que já a torna neutra em relação a gás carbônico, já que as plantas o absorvem do ar, mas através de alguns processos, pode se tornar uma fonte produtora de hidrogênio verde e influenciar fortemente a matriz energética mundial, já que, apenas 5% de toda biomassa disponível para produção de energia é aproveitada.

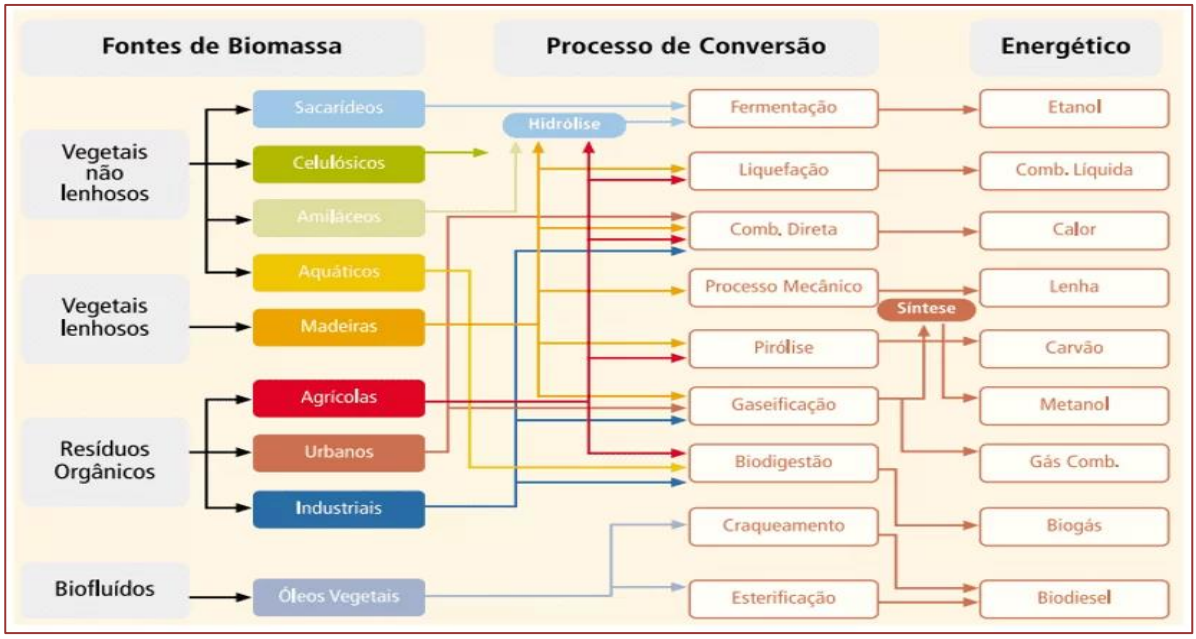
Figura 2 - Representação esquemática da produção de hidrogênio por eletrólise.



Fonte: Sousa, 2013

No Brasil, é de extrema importância pois as fontes de biomassa mais populares se encontram em abundância no país, mas muito pouco é aproveitado, um exemplo é a cana-de- açúcar, que pode produzir bioetanol e o bagaço pode ser usado como biomassa para produção de hidrogênio verde. Na Figura 3 é possível visualizar os diferentes tipos de matéria-prima e processos adotados para produção de energia.

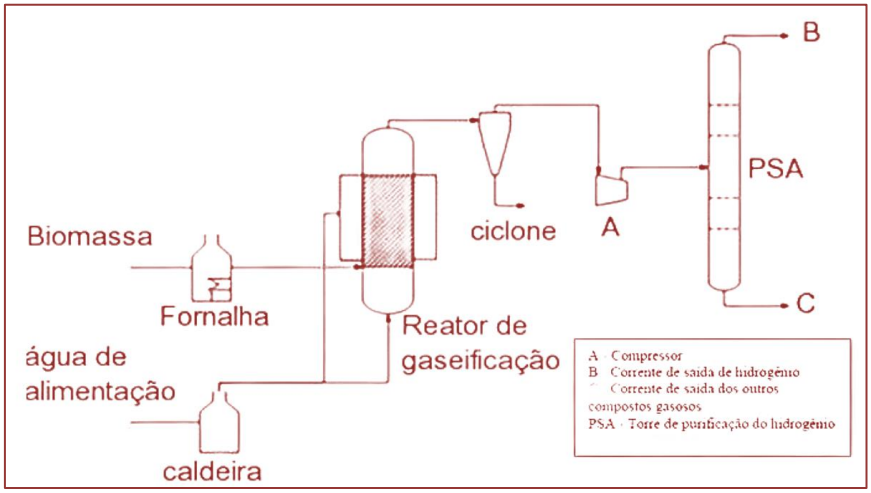
Figura 3 - Processo de produção de energia através da biomassa.



Fonte: Fukurozaki, 2011

Um dos principais processos de produção de hidrogênio a partir de biomassa é a gaseificação a vapor, conforme descrito na Figura 4, que envolve a adição de biomassa, óxido de cálcio e vapor no interior de um reator. A biomassa é inserida em uma fornalha a baixas temperaturas e com baixo teor de oxigênio para uma queima parcial, facilitando sua decomposição. Esses restos são então introduzidos no reator, onde também entram vapor de água e óxido de cálcio. Dentro do reator, ocorre a produção de diversos gases e cinzas, sendo a principal função do óxido de cálcio agregar-se ao gás carbônico e facilitar sua separação na etapa seguinte, que é a separação no ciclone (GODOY e VIEIRA, 2015). No ciclone, ocorre a separação da parte sólida da parte gasosa, com a segunda sendo enviada a um compressor ligado a uma torre de purificação. Na torre de purificação, há filtros internos e duas saídas, uma superior e uma inferior. Na saída inferior, a maioria dos gases e subprodutos, incluindo o carbonato de cálcio formado no reator, são removidos. Na saída superior, o hidrogênio, que é um gás muito mais leve que os outros produtos formados no processo, é extraído (GODOY e VIEIRA, 2015).

Figura 4 - Processo de produção de hidrogênio usando biomassa.



Fonte: Yunus, 2010

O uso de biomassas ainda é limitado por ser um recurso subutilizado pelos países com a maior produção, tendo ainda muita tecnologia a ser desenvolvida no setor, mas já é apontado como um substituto do carvão e um potencial substituto do petróleo quando este recurso começar a atingir níveis de escassez mais altos.

4. HIDROGÊNIO VERDE: PRINCIPAIS PRODUTORES

Como a produção de hidrogênio verde parte do uso de outras fontes renováveis de energia, é natural que países com grande disponibilidade desses recursos tenham mais interesse nessa nova cadeia produtiva, porém, mesmo países com menos recursos investem em mais tecnologias para se tornarem competitivos nesse nova geopolítica internacional. Estes investimentos em tecnologias podem ser visualizados pela quantidade de patentes depositadas, como mostra a Figura 5.

A China é o país que mais investe em produção de hidrogênio. Hidrogênio este que ainda é majoritariamente de fontes poluentes pois a demanda energética do país é muito elevada, mas em extensão territorial e capacidade produtiva de hidrogênio verde, a China já os reconhece e tem transacionado seus esforços para uma produção mais limpa (MATOS e BITENCOURT, 2023).

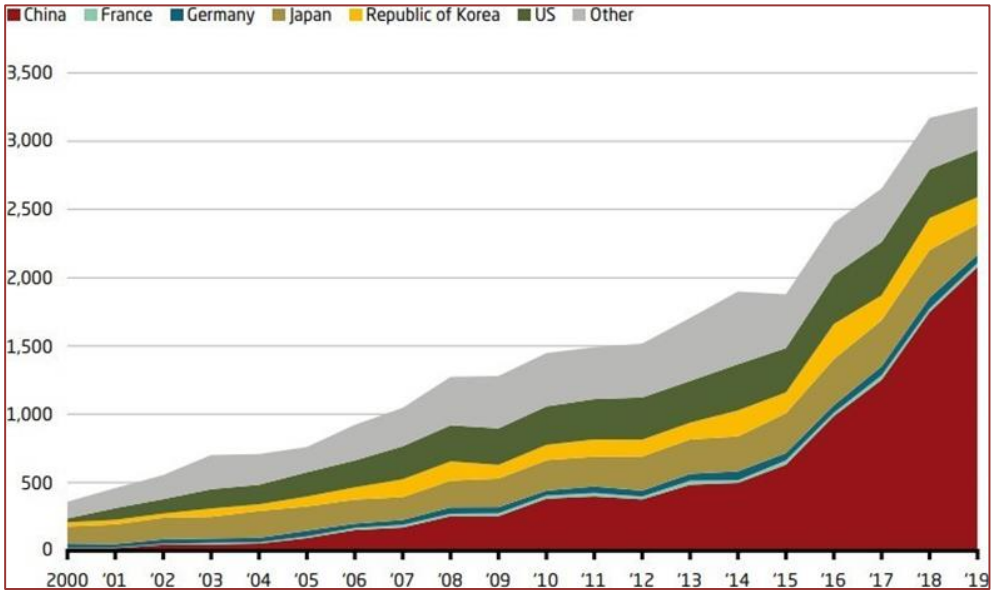
A China encara a produção de hidrogênio verde como a "próxima fronteira tecnológica", e mira alto: em se tornar a referência em produção de hidrogênio verde em todo o mundo. A diferença entre China e Europa em relação a tecnologia de hidrogênio verde diminui rapidamente: a China já é responsável por 1/3 da produção de todos os eletrolisadores do mundo, as políticas regionais e das empresas do setor já estão com uma agenda muito à frente do planejamento nacional para a transição energética, apesar de Estados Unidos, Japão e Europa terem uma pesquisa e desenvolvimento mais a frente que a China, é apontado que este "gap" será fechado em menos de cinco anos, entre diversas outras ações que são tomadas para atingir a meta estabelecida internamente no país (BROWN e GRÜMBERG, 2022).

Uma forma de avaliar isto é analisar as novas estratégias de mercado de diversas gigantes do setor energético da China, como por exemplo:

SINOPEC (China Petroleum & Chemical Corporation): é a maior produtora de hidrogênio na China, produzindo mais de 3,5 milhões de toneladas/ano, correspondente a 14% da produção do país. A empresa já começou a investir capital no setor de produção de hidrogênio verde desde 2020 e a planta de produção de hidrogênio renovável em Xinjiang fornecerá hidrogênio ecologicamente correto para a produção de produtos químicos, ajudando assim a descarbonizar as fábricas químicas em Xinjiang (KAS, 2022).

LONGi Green Energy Technology é uma das maiores fabricantes de painéis solares da China, já migra suas pesquisas para o setor de produção de hidrogênio verde aproveitando a experiência no mercado de energias renováveis (CHEN *et al.*, 2019).

Figura 5 – Número de patentes registradas relacionadas a produção de hidrogênio verde.



Fonte: Brown e Grünberg (2022).

Na União Europeia (UE), se destacam os investimentos, mas principalmente sua agenda onde, ano após ano, são estabelecidas novas metas de "Carbono Zero" e recordes de investimento em energias limpas, caso da BMW que, em sua sede em Munique, não produz mais motores a combustão interna desde novembro de 2023, focando apenas em motores elétricos ou de outras fontes renováveis (Revista Quatro Rodas, 2024). Tudo isso para cumprir metas estabelecidas pelo Acordo de Paris em 2015, a Grã-Bretanha e a França têm cargos permanentes como conselheiros da ONU. Todo este empenho público mostra como a UE está comprometida em atingir a neutralidade nas emissões até os prazos estabelecidos para 2030 (OLIVEIRA, 2021).

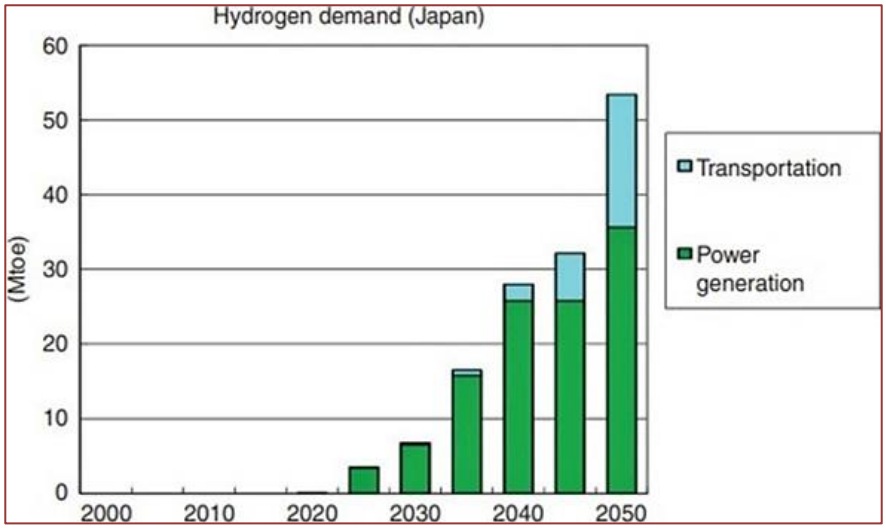
Como falado anteriormente, a BMW é uma das montadoras que se comprometeu a produzir apenas veículos civis elétricos até 2027, restando apenas sua frota de veículos de serviço (caminhões, ônibus, vans, etc.) utilizando combustíveis fósseis, mas de forma reduzida (BMW GROUP, 2024). Isto é possível devido a uma parceria firmada entre a alemã e uma montadora japonesa Toyota, que é referência mundial quando o assunto é veículos movidos a hidrogênio. O resultado dessa parceria é o BMW iX5, um SUV movido a hidrogênio que utiliza a tecnologia do Toyota Mirai, um sedã a hidrogênio que foi cobaia de testes da japonesa em diversos lugares. Os dois veículos se comportam como um

veículo elétrico, mas tem uma dirigibilidade mais semelhante a veículos de combustão comuns, onde o eletrolisador fica no cofre do motor, aproveitando o espaço onde tradicionalmente haveria um motor de combustão interna (CPG, 2022).

Isso mostra que, apesar de ser uma tecnologia de ponta, à medida que novos padrões são alcançados, essas tecnologias estão cada vez mais inseridas no dia-a-dia das pessoas. É um empenho público-privado que torna essas agendas ditas como "rigorosas" algo possível num prazo tão curto.

Outro país que investe muito no hidrogênio verde é o Japão, porém, segue uma estratégia diferente: já que é inferior aos seus concorrentes em relação a recursos naturais e território, investe pesado em tecnologia de ponta para reduzir as dependências em energias nucleares, como mostra a Figura 6. O Japão se prepara para entrar numa era de independência energética limpa, partindo desde o Protocolo de Kyoto, em 1997, e se impulsionando ainda mais a partir do Acordo de Paris em 2015. A parceria com a BMW é um exemplo de como o país se prepara para esta mudança e já se projeta a demanda, sendo também apoiada pelo poder público.

Figura 6 - Expectativa da demanda de hidrogênio no mercado interno do Japão.



Fonte - Iida e Sakata (2019).

Em dezembro de 2017, o "Conselho Ministerial sobre Energia Renovável, Hidrogênio e Questões Relacionadas" do Japão decidiu sobre uma "Estratégia Básica de Hidrogênio". Os principais pontos da estratégia são:

i. Visão sobre a Ação 2050+ até 2030;

ii. Posicionar o hidrogênio como uma nova opção de energia livre de carbono alinhada com as energias renováveis;

iii. Metas de custo do hidrogênio: 0,70$USD/$Nm^3$ (2019) para 0,20$USD/$Nm^3$ (até 2030).

A meta estratégica de custo do hidrogênio de 0,20$USD/$Nm^3$ de 2030 foi definida com base em que, até então, a cadeia de fornecimento de hidrogênio em escala comercial deveria ser estabelecida em 300.000 toneladas de hidrogênio transportado pelo país (IIDA e SAKATA, 2019).

Um mercado próximo e muito promissor ao Japão é o da Austrália. O país é rico em extensão territorial e recursos naturais, sendo um candidato natural à posto de grande produtor de hidrogênio verde na geopolítica atual. O governo australiano já analisa questões infraestruturais do país e o potencial do país, assim como o comércio de Japão e Coréia do Sul como possíveis interessados, sendo um competidor direto da China no mercado do leste asiático (WALSH *et al*., 2021).

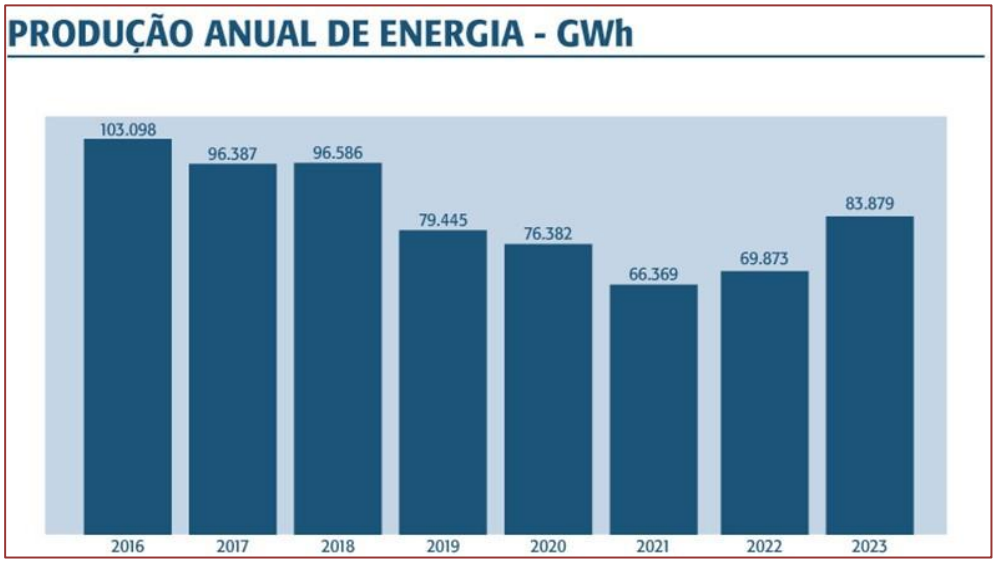
5. HIDROGÊNIO: CENÁRIO NO BRASIL

Nas duas últimas décadas (2000 a 2020), medidas internas no país foram adotadas para favorecer a instalação de fontes renováveis de energia a todos os cidadãos brasileiros. O primeiro projeto a adotar esse sistema no país foi o PAC (Programa de Aceleração do Crescimento) em 2007, com o objetivo de retomar grandes obras de infraestrutura social, urbana, logística e energética (PINTO, 2017).

Entre 2000 e 2017, foram realizados 395 empreendimentos no setor de energia, sendo eles 344 empreendimentos no setor de geração e transmissão de energia elétrica com enfoque na produção de energia renovável, destes, 62 focados em infraestrutura do setor eólico e 31 focados em infraestrutura de usinas térmicas usando biomassa (CARDOSO e NAVARRO, 2016); 6 empreendimentos focados em aumentar a produção de energias renováveis; 45 empreendimentos focados na distribuição social e urbana de iluminação, como no programa “Luz para Todos”(PINTO, 2017).

Apesar de ser dependente de petróleo como a maioria dos países, o Brasil se destaca por utilizar uma energia limpa: a hidroenergia. A Hidrelétrica de Itaipu, inaugurada em 1984, concede energia a todos os estados do país e produziu no ano de 2023 um total de 83.879GWh (Figura 8), sem produzir uma única grama de CO2, sendo um exemplo mundial (ITAIPU BINACIONAL, 2024).

Figura 8 - Produção de energia da Hidrelétrica de Itaipú nos últimos 8 anos.



Fonte - Itaipu Binacional (2024)

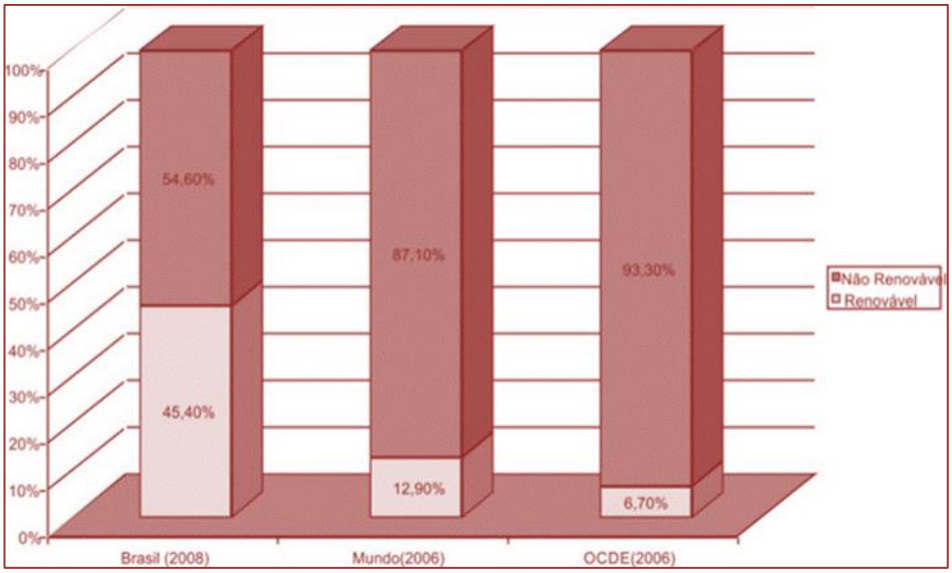
Mas isso não reflete no panorama completo da situação, uma vez que a hidrelétrica produzia apenas 8,7% da energia utilizada no país (ITAIPU BINACIONAL, 2024), sendo que segundo Andrade e Mattei (2013), no ano de 2008 o total das energias utilizadas no país eram 45,40% de fontes renováveis (Figura 9).

Nos anos posteriores, houve um aumento no investimento em energias renováveis, mas isto não refletiu no acréscimo no uso de energias limpas como mostra a Figura 10, apesar de ser um setor dominante no mercado brasileiro. A energia hidrelétrica pode aumentar repentinamente de custo com as secas e pode ter impactos ambientais significativos com as barragens e represas. Assim, se faz necessário investir e diversificar o uso das energias renováveis garantindo maior segurança (OLIVEIRA e CHEDIEK, 2024).

Para garantir uma política de produção de energia sem emissões de carbono, é necessário diversificar as fontes de produção, já que, caso ocorram adversidades no sistema produtivo, este problema não comprometa a segurança energética de um país, como exemplo: um período de pouca luz solar numa área de painéis solares, ou ventos fracos numa fazenda eólica.

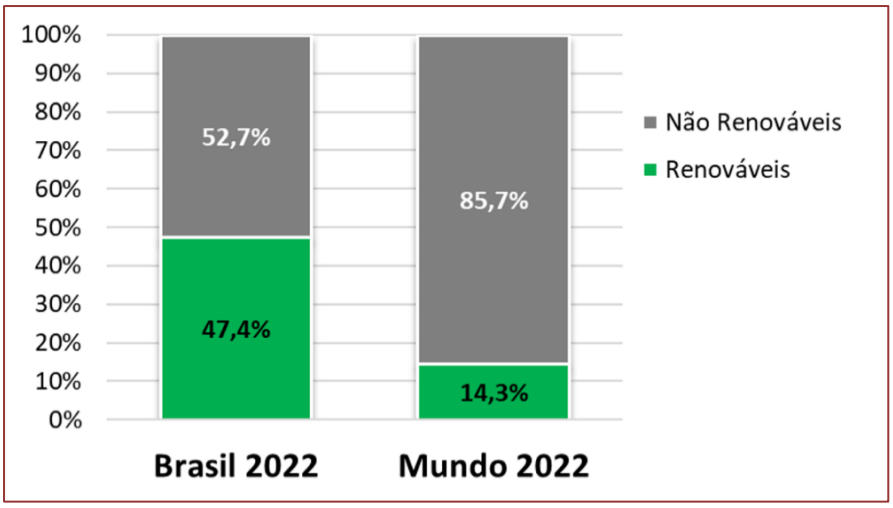
Mas qual o verdadeiro potencial de produção de hidrogênio verde do Brasil? O Brasil possui um alto potencial para a produção de hidrogênio verde, com sua matriz energética já composta majoritariamente por fontes renováveis (Tabela 1), como eólica, solar, bioprodutos e hidroenergia (MINISTÉRIO de MINAS e ENERGIA, 2024).

Figura 9 - Gráfico comparando consumo de energias renováveis Brasil x Mundo.



Fonte – Andrade e Mattei (2013).

Figura 10 - Oferta interna de energia no Brasil em comparação com o resto do mundo em 2023.



Fonte: EPE (2022).

Tabela 1 - Percentual de produção de energias renováveis no país em 2020.

Fontes	%
Hidrelétricas	63,8
Eólicas	9,3
Biomassa e Biogás	8,9
Solar	1,4

Fonte: Ministério de Minas e Energia (2020)

A sanção do Projeto de Lei do Hidrogênio pelo Presidente Lula, em agosto de 2024, posiciona o Brasil como um protagonista na transição energética global, criando uma nova indústria e promovendo desenvolvimento tecnológico na produção de hidrogênio de baixa emissão de carbono, segundo o Ministro de Minas e Energia Alexandre Silveira. O país, com grande potencial para produzir hidrogênio verde devido à sua vasta matriz de energias renováveis, precisa avançar em resoluções logísticas e tecnológicas, especialmente em transporte e armazenamento (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2024).

Outras decisões políticas já destacam tópicos relacionados ao hidrogênio e seu papel no futuro sustentável do país, como a Resolução CNPE nº 2 de 2021, que estabelece prioridade em investimentos de pesquisa e desenvolvimento. Com o país possuindo um elevado potencial na produção de hidrogênio verde e um parque energético vasto em energias renováveis, restam apenas resoluções logísticas e tecnológicas essenciais, setores mais carentes da indústria nacional e que desafiam toda a cadeia produtiva, como transporte, armazenamento, distribuição e consumo (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2024).

O verdadeiro potencial produtivo de hidrogênio verde no Brasil se destaca no Nordeste, devido à abundância de fontes de energia solar e eólica nas regiões costeiras, que oferecem condições ideais para a produção de energias limpas capazes de alimentar plantas de produção de hidrogênio. Estados como Ceará, Pernambuco e Bahia já estão tomando iniciativas para implementar a infraestrutura necessária para acomodar essa indústria (LIMA, 2023).

No Ceará, o Complexo de Pecém já possui uma iniciativa para produzir e exportar hidrogênio através do Porto de Pecém. O Porto de Suape, em Pernambuco, em parceria com o Senai, está passando por melhorias para receber os produtos do *Tech Hub* Hidrogênio Verde produzido no estado. Na Bahia, o polo petroquímico de Camaçari foi o primeiro projeto nacional para a produção de hidrogênio verde em escala industrial, com um investimento de US$ 1,5 bilhões e capacidade para produzir 100 mil toneladas até 2027 (LIMA, 2023).

Apesar do avanço do Brasil na produção de hidrogênio, a progressão é lenta em comparação com outros países do BRICS, parceiros do Brasil que também investem na produção de hidrogênio. O Brasil ainda está na etapa de "produção de baixa emissão", enquanto todos os concorrentes já miram em produções de hidrogênio sem CO_2 em seu processo.

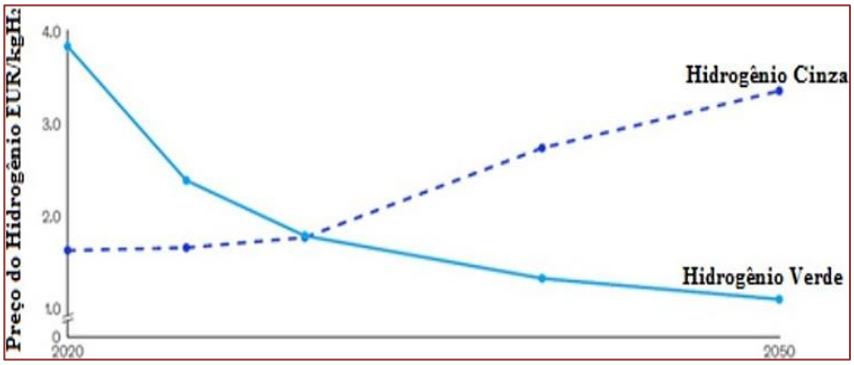
6. PRINCIPAIS DESAFIOS NA PRODUÇÃO E USO DO HIDROGÊNIO VERDE

O hidrogênio verde é uma fonte energética que atrai os olhos da comunidade científica e empresas do setor de todo o mundo, mas mesmo assim, ainda encontra certa dificuldade de se consolidar no mercado por alguns motivos:

Preço: O preço do hidrogênio ainda impede sua competitividade em relação a fontes mais “tradicionais” de energia, especialmente no caso do hidrogênio verde, uma vez que este é um mercado novo e novas técnicas devem ser adotadas ao longo do tempo para reduzir o custo de produção e, consequentemente, o custo total do produto, conforme mostrado na Figura 12. Espera-se que o custo de produção do hidrogênio caia 70% ao longo desta década, e que o mercado mundial da eletrólise de hidrogênio cresça 1000 vezes em relação ao volume atual (LARA e RITCHER, 2023).

Infraestrutura: Dado que as especificações para a produção de hidrogênio não são compatíveis com os métodos já utilizados, é necessário investir em logística e tecnologias específicas. A falta de padronização leva cada país a investir em transporte e armazenamento conforme suas possibilidades, o que embaralha a cadeia de produção e resulta em experimentações que podem ser ineficazes ou apenas de curto prazo, não sendo viáveis a longo prazo. A produção de hidrogênio requer investimentos em logística e tecnologias específicas, pois as especificações de produção não se alinham com os métodos existentes. A falta de padronização resulta em experimentações ineficazes e pode comprometer a cadeia produtiva. Por exemplo, os gasodutos tradicionais não são adequados para o hidrogênio, pois a interação do gás com o material metálico dos canos pode causar furos e bloqueios (LOUVIAUX e COLOT, 2022).

Figura 12 - Expectativa no valor do Kg de H_2 verde até 2050.



Fonte - Campos et al, 2022.

Profissionais capacitados: O setor exige profissionais técnicos capazes de compreender as demandas e características de um sistema de gestão de hidrogênio. Incidentes que comprometem a produção podem ser evitados, mas apenas por pessoas capacitadas para entender os riscos associados a tais operações. O hidrogênio possui uma estrutura molecular única: é muito leve, inodoro e incolor, o que facilita seu vazamento e dificulta sua detecção. Além disso, possui baixa energia de ignição, tornando qualquer mistura um potencial risco de incêndio devido à sua alta inflamabilidade, resultando em incêndios de alto grau (WHA International, 2023).

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Apesar de o hidrogênio verde ser uma fonte de energia rica e abundante, ainda existem alguns fatores limitantes que precisam ser superados, como a ausência de padronização, a falta de conhecimentos específicos sobre a cadeia de produção, infraestrutura inadequada para produção e transporte, carência de pessoal técnico especializado e um valor pouco competitivo no mercado atual, uma vez que ainda não se consolidou globalmente. No entanto, os investimentos recordes anuais e o entendimento de que apenas uma fonte de energia renovável não é suficiente para atender à crescente demanda energética global tornam necessário reconhecer o papel crucial que o hidrogênio verde terá no futuro. Sua influência na geopolítica e nas parcerias entre países com grande potencial produtor e os detentores das tecnologias de produção é inevitável.

Reconhecer o potencial do hidrogênio verde como elemento-chave para a descarbonização de cadeias produtivas é essencial para alcançar as metas estabelecidas. Trata-se de um recurso abundante, com alto valor energético e produção simples, com coprodutos inofensivos à natureza, sendo fundamental para a transição energética global. Apesar dos diversos fatores que dificultam sua produção atualmente, muitos países estão apostando em seu potencial para as próximas décadas. O Brasil, por exemplo, possui condições ideais para assumir uma posição estratégica na produção de hidrogênio verde, visto que é um dos maiores produtores de energias renováveis, sendo reconhecido como uma potência no setor e capaz de desenvolver novas tecnologias que acelerem ainda mais a descarbonização interna (pequenas plantas produtoras espalhadas pelo país) e externa, atendendo a países parceiros no setor.

Contudo, é necessário um estudo abrangente da cadeia de produção do hidrogênio

verde, não apenas do ponto de vista energético, mas também ambiental e acadêmico, pois há uma carência de profissionais capacitados e infraestrutura adequada. É fundamental o incentivo dos setores público e privado para viabilizar o mercado de hidrogênio, possibilitando um futuro com baixas emissões de gases poluentes e com sustentabilidade energética para suprir a demanda de diversos setores industriais.

REFERÊNCIAS

[1] ANDRADE, A. L. C., MATTEI, L. A (in)sustentabilidade da matriz energética brasileira. Revista Brasileira de Energia, v. 19, n. 2, p. 9-36, 2024. Disponível em: <https://sbpe.org.br/index.php/rbe/article/view/304>. Acesso em: 20 de set. 2024.

[2] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (Brasil). Bibliografia Temática: Energia de biomassa - Centro de Documentação. Brasília : ANEEL : CEDOC, v. 2, n. 2, p. 14, 2020.

[3] BORGES, A. C. F. Hidrogênio verde: alternativa para reduzir as emissões de gases de efeito estufa e contribuir com a transição energética. 2022. 66 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia de Energia) UNESP, Rosana-SP, 2022. Disponível em <https://repositorio.unesp.br/server/api/core/bitstreams/52d44e60-bac6- em: 4b97-9cdb-5664bc27088d/content>. Acesso em: 20 de set. 2024.

[4] BMW GROUP. Fábrica do BMW Group em Munique produzirá exclusivamente modelos 100% elétricos a partir do final de 2027. PressClub Brasil, 2024. Disponível em: https://www.press.bmwgroup.com/brazil/article/detail/T0439051PT/fábrica-do- bmw- group-em-munique-produzirá-exclusivamente-modelos-100-elétricos-a-partir-do-final-de-2027? language=pt. Acesso em: 25 de set. 2024.

[5] BROWN, A.; GRÜMBERG, N. China's nascent green hydrogen sector: How policy, research and business are forging a new industry. Merics China Monitor, p. 1-24, 2022. Disponível em: https://merics.org/sites/default/files/2022-06/MERICS_China_Monitor_No_77_Green-Hydrogen_EN_final.pdf. Acesso em: 30 de set. 2024.

[6] CAMPOS, A. M. A. **ALTERNATIVAS PARA A PRODUÇÃO DE AÇO COM BAIXA EMISSÃO DE DIÓXIDO DE CARBONO.** *In: 41° Seminário de Balanços Energéticos Globais e Utilidades*, São Paulo, 2022. p. 1-16. ISSN: 2594-3626, DOI 10.5151/2594-3626-34158.

[7] CARDOSO JR, J. C.; NAVARRO, C. A. O Planejamento Governamental no Brasil e a experiência recente (2007 A 2014) do programa de aceleração do Crescimento(PAC). IPEA, Brasília-DF, p. 1-74, 2016. Disponível em:https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/6590/1/td_2174.pdf .

[8] COMPANHIA DE PETRÓLEO E GÁS. Quais os perigos do hidrogênio?. Rio de Janeiro-RJ. 2022. Disponível em: <https://clickpetroleoegas.com.br/blog/hidrogenio/quais-os-perigos-do-hidrogenio/>. Acesso em: 18 set. 2024.

[9] EL-EMAM, R. S.; ÖZCAN, H. Comprehensive review on the technoeconomics of sustainable large-scale clean hydrogen production. Journal of Cleaner Production, v. 220, p. 593-609, 2019.

[10] EPE - Empresa de Pesquisa Energética. Matriz Energética e Elétrica. 2022. Disponível em: https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica. Acesso em: 24 set. 2024.

[11] FUKUROZAKI, S. H. Avaliação do ciclo de vida de potenciais rotas de produção de hidrogênio: estudo dos sistemas de gaseificação da biomassa da energia solar fotovoltaica. IPEM, São Paulo-SP, 2011. 180p.

[12] GODOY, R.; OLIVEIRA, O. Simulação da cinética reacional de um gaseficador de biomassa de leito fluidizado para produção de hidrogênio. FATEB, Telêmaco Borba–PR, 2015, p.1-10, 2015. Disponível em:https://www.researchgate.net/publication/301987438.

[13] HOLLER, F. J.; WEST, D. M.; SKOOG, D. A. Princípios da Química Analítica. 4. ed. Boston, Massachussets: Cengage Learning, 1988. p. 1088, v. 1.

[14] IIDA, S.; SAKATA, K. Hydrogen technologies and developments in Japan: clean energy. v.3, n.2, p.105-103, 2019.

[15] IRENA - International Renewable Energy Agency. Geopolítica da Transformação Energética: O Fator Hidrogênio. 2020. Disponível em: https://www.irena.org/Digital-Report/Geopolitics-of-the-Energy-Transformation. Acesso em: 20 set. 2024.

[16] IPEA – INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA. Panorama do Hidrogênio no Brasil. 2022. Disponível em: https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/11291/1/td_2787_web.pdf. Acesso em: 09 set 2024.

[17] ITAIPU BINACIONAL. Produção Anual de Energia: Líder mundial na geração de energia limpa e renovável. 2024. Disponível em: https://www.itaipu.gov.br/energia/geracao. Acesso em: 16 de ago. de 2024.

[18] KAS. Perception of the implementation of a hydrogen economy in Asia-Pacific: an expert survey. Hong Kong-CH. Konrad Adenauer Stiftung, 2022. Disponível em: https://www.kas.de/documents/265079/265128/. Acesso em: 20 set. 2024.

[19] KRUSE, B.; GRINNA, S.; BUCH, C. Hydrogen Status og muligheter. Bellona, Oslo-NO, n.4, p.1-53. 2002.

[20] LARA, D. M.; RITCHER, M. F. Hidrogênio verde: a fonte de energia do futuro. Novos Cadernos NAEA, Rio Grande do Sul, v.26, n.1, p.413-436,1, 2023.

[21] LIMA, A. C. O. Hidrogênio verde: principais perspectivas do cenário energético no Nordeste brasileiro. UFC, Fortaleza-CE, p. 1-63, 2023 .

[22] LOUVIAUX, S.; COLOT, C. Pitting corrosion, Pitting resistance equivalent number (PREN), Critical pitting temperature (CPT), Critical pitting potential. CMI Groupe, Searing-BE, p.1-6, 28 set. 2022. Disponível em: https://confluence.cmigrou-pe.com/display/HPDS/A.4+-+Pitting+corr. Acesso em: 18 set. 2024.

[23] MATOS, J. de C.; BITENCOURT, G. F.; Os investimentos em hidrogênio verde no mundo e o papel do Brasil nesta cadeia produtiva. Revista Processando o Saber, [*s. l.*], v. 15, n. 01, 98-112, 2023. Disponível em: https://www.fatecpg.edu.br/revista/index.php/ps/article/view/298. Acesso em: 13 set. 2024.

[24] MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (Brasil). Coges-PNH2 inicia atividades para elaboração da proposta do decreto regulamentar da Lei do Hidrogênio. Diário Nacional da União, p.1, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/coges-pnh2-inicia-atividades-para-elaboracao-da-proposta-do-decreto-regulamentar-da-lei-do-hidrogenio>. Acesso em: 29 set. 2024.

[25] MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (Brasil). Fontes de energia renováveis representam 83% da matriz elétrica brasileira. 2020. Disponível em: https://www.gov.br/pt-br/noticias/energia-minerais-e-combustiveis/2020/01/fontes-de-energia-renovaveis-representam-83-da-matriz-eletrica-brasileira. Acesso em: 24 set. 2024.

[26] OLIVEIRA, F. P.; CHEDIEK, J. Comunidades de Energia. Coimbra-PT, p. 211, 2024. Disponível em: https://books.google.com.br/books?id=2x4VEQAAQBAJ&printsec=frontco ver&hl=pt-BR#v=onepage&q&f=false. Acesso em: 25 set. 2024.

[27] OLIVEIRA, Y. P. L. Desafios do Mercado de Carbono após o Acordo de Paris: Uma revisão. Open Journal System, v.4, n.1, 17, 2021.

[28] OSMAN, A. I. Catalytic hydrogen production from methane partial oxidation: mechanism and kinetic study. Chemical Engineering & Technology, v. 43, n. 4, p.641-648, 2020.

[29] PAIVA, S. S. M. Produção de hidrogênio verde ambientalmente sustentável. 2022. 112p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal-RN, 2022.

[30] PINTO, M. C. O. Uma história de dois PACS: a gestão dos investimentos públicos em infraestrutura a partir do Programa de Aceleração do Crescimento. Serviços e Informações do Brasil (GOV.br), 14 mar. 2017. Disponível em: https://bibliotecadigital.economia.gov.br/handle/123456789/945. Acesso em: 19 set. 2024.

[31] SOARES, J. D. M. Produção de hidrogênio a partir de cascas de banana em reator anaeróbico em batelada. 66p. 2019. Dissertação (Mestrado Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento) - Centro de Ciencias e Tecnologia, Universidade Federal de Alagoas, Maceió-AL, 2019.

[32] SOUSA, A. B. Estudo de um eletrolisador bipolar alcalino visando a produção de H2. 2013. 119p. Tese (Doutorado em Engenharia Química) Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande-PB, 2013.

[33] WALSH, S. D. C.; EASTON, L.; WENG, Z.; WANG, C.; MOLONEY, J.; FEITZ, A. Evaluating the economic fairways for hydrogen production in Australia. International Journal of Hydrogen Energy, Melbourne-AU, v. 46, p.12, 2021.

[34] WHA INTERNATIONAL INC. (EUA). WHA's Hydrogen Fire Risk Management Philosophy, 2023. Disponível em: https://wha-international.com/hydrogen-fire-risk-management/. Acesso em: 20 set. 2024.

[35] YUNUS, M. K.; AHMAD, M. M.; INAYAT, A.; YUSUP, S. Simulation of Enhanced Biomass Gasification for Hydrogen Production using iCON. International Scholarly and Scientific Research & Innovation, 4(2) p. 206 -212, 2010.

Autores

Romário da Silva Santos

Graduado em Licenciatura Plena em Física pela Universidade Estadual da Paraíba - UEPB (2017) e em Licenciatura em Matemática pela Universidade Cruzeiro do Sul (2023), Especialista em Ensino de Matemática pelo Instituto Federal da Paraíba - IFPB (2021), Mestre em Física pela Universidade Federal de Campina Grande - UFCG (2019) e Doutorando em Engenharia de Processos na Universidade Federal de Campina Grande - UFCG (2021 - atual). Possui experiência na Área da Física, com ênfase em Cosmologia Teórica e Observacional, em Modelagem Matemática e Ensino, além de abordagens práticas de aprendizagem em Física e Matemática. Também tem experiência em processos e metodologias de pesquisa científica e ainda em aulas de Física, Matemática e Ciências Naturais nos diferentes níveis.

Antonio Gilson Barbosa de Lima

Graduado em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal da Paraíba (1991), Graduado Licenciatura Plena em Física pela Universidade Estadual da Paraíba (1990), Mestre em Engenharia Mecânica [C. Grande] pela Universidade Federal da Paraíba (1995) e Doutor em Engenharia Mecânica pela Universidade Estadual de Campinas (1999). Atualmente é Professor Titular do Departamento de Engenharia Mecânica, do Centro de Ciências e Tecnologia, da Universidade Federal de Campina Grande. Tem experiência na área de Engenharia Mecânica, com ênfase em Transferência de calor e massa, Escoamento fluido, Matemática aplicada, Princípios Variacionais e Métodos Numéricos, atuando principalmente nos seguintes temas: volumes finitos, secagem e desenvolvimento de secadores, escoamento multifásico e meios porosos. Tem publicado um número expressivo de artigos em periódicos de relevância, livros e capítulos de livros em editoras de reconhecida competência internacional e formado recursos humanos de alto nível (Graduação, mestrado e doutorado).

Adriano de Sousa Cabral

Doutorando em Engenharia de Processos pela Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, Mestrado em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal de Campina Grande - UFCG. Pós-graduado em Administração de Empresas pela Fundação Getúlio Vargas - FGV. Graduado em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal de Campina Grande - UFCG. Morgana de Vasconcellos de Araújo Graduada (2012) e mestre (2014) em Engenharia Química (UFCG) com ênfase em petróleo e gás. Doutora (2019) em Engenharia de Processos (UFCG). Especialista em Fluidodinâmica Computacional com diversos projetos desenvolvidos na área. Técnica de Laboratório Área Química na UFCG desde 2021.Professora Efetiva de Química do Governo da Paraíba desde 2021.Docente do programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos da UFCG desde 2024.

Sandra Maijane Soares de Belchior

Com mais de 20 anos de atividades profissionais em cargos técnicos em empresas de grande, médio e pequeno porte e de direção na área pública; Doutoranda em Ciências políticas da Educação pela UPAP, Universidade Politica e Artistica do Paraguay; Doutoranda em Engenharia de Processos pela UFCG, Universidade Federal de Campina Grande; Mestre em Sistemas Agroindustriais- -UFCG, Universidade Federal de Campina Grande; Especialização em Gestão Econômica e estratégias de Negócios-FIP, Políticas Educativas-FIP, Geopolítica e História pelaFIP, Ciências Ambientais pela FIP; Bacharel em Ciências Econômicas - FIP. Consultora, desde2006, em projetos de viabilidade econômico financeira, Empreendedorismo e ReestruturaçãoEmpresarial; Diretora da Belchior Consultoria & Projetos. Professora de Economia I dos cursosde graduação em Administração na Faculdade São Francisco Da Paraíba, FASP. Diretor presidente da Faculdades Integradas do Ceará UniFIC desde 2013; Professora nas áreas de Educação, Economia e Empreendedorismo - UniFIC, Faculdades Integradas do Ceará desde2013.

Mario Eduardo Rangel Moreira Cavalcanti Mata

Possui Graduação em Engenharia Agronômica pela Universidade Federal de Viçosa (1975), Mestrado em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal de Viçosa (1979) e Doutorado em Engenharia de Alimentos pela Universidade Estadual de Campinas (1997). É Professor Titular da Universidade Federal de Campina Grande (2014). Bolsista de produtividade do CNPq. Foi presidente da Sociedade Brasileira de Corantes Naturais (2001-2005). Exerceu várias funções administrativas entre elas a Chefia do Departamento de

Engenharia Agrícola por dois períodos (1980-1982) e (1991-1993); Diretor do Núcleo de Tecnologia em Armazenagem por três mandatos (1986-1988), (1988- 1990), (1990-1991); Assessor da Reitoria (2002-2004); Coordenador Geral de Pesquisa (2005-2008); Coordenador do Projetos CT-INFRA da UFCG (2006-2008); Pró-Reitor substituto de Pós-Graduação da UFCG (2006-2008); Coordenador do Curso de Graduação em Engenharia de Alimentos (2011-2014). Coordenador Administrativo da Unidade Acadêmica de Engenharia de Alimentos (2014-2015); Chefe do Laboratório de Criogenia (2014 até o momento); Assessor de Pesquisa da Diretoria do Centro de Tecnologia e Recursos Naturais (2014 a 2017); Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Gestão de Recursos Naturais (2017-3/2021); Chefe do Laboratório de Agroindústria (2018 -3/2021). Atualmente é Vice Reitor da Universidade Federal de Campina Grande, sendo cumulativamente Pró-Reitor de Pós-Graduação e Pesquisa. É Editor Chefe da Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais desde (1999). Tem experiência na área de Engenharia Agrícola, Engenharia de Alimentos e Engenharia Agronômica. Ainda em Armazenamento de produtos agrícolas, Secagem de produtos agroindustriais, Crioconservação de sementes, Processamento de grãos e alimentos, Congelamento de alimentos, Armazenagem refrigerada, Automação de sistemas, Propriedades físicas dos materiais biológicos, Desenvolvimento de softwares aplicados e Processamento de imagens para sistemas operatrizes; Sistemas de controle e inteligência artificial.

Karoline Stefany Ferreira da Luz

Possui graduação em Engenharia Mecânica pelo Centro Universitário Maurício de Nassau - Recife (2016). Mestrado em Engenharia Física pela Universidade Federal Rural de Pernambuco (2021). Trabalhou como programadora de manutenção na empresa Simisa Simioni Metalúrgica. Tem experiência na área de Engenharia Mecânica, com ênfase em Programação de manutenção. Atua como professora nível técnico no SENAI e nível superior em Engenharia mecânica na Faculdade Maurício de Nassau.

Marcelio Ronnie Dantas de Sá

Mestre em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal de Campina Grande. Participou do Grupo de Pesquisa GEDS (Grupo de Energia e Desenvolvimento Sustentável. Foi monitor voluntario na disciplina Máquinas Térmicas atuando no Laboratório Experimental de Máquinas Térmicas (LEMT) no apoio aos alunos, fazendo demonstrações das atividades práticas relacionado a desmontagem e montagem de motores de combustão interna e seus componentes. Foi bolsista do PIBIC no projeto de pesquisa: *DESENVOLVIMENTO E TESTES DE CAMPO NOS SECADORES SOLARES USADOS NA PRODUÇÃO DE BANANA-PASSA NA REGIÃO DE CAMPINA GRANDE*. Participou do programa Ciências Sem Fronteiras na Alemanha na TU Bergakademie Freiberg onde foi desenvolvido projetos de modelagem mecânica através de softwares CAD e de gerenciamento de equipes, além da experiência através da interdisciplinaridade e trabalho em equipe. Estagiou na COTEMINAS SA no setor de Utilidades, onde foram desenvolvidas habilidades de gerenciamento, acompanhamento e desenvolvimento de projetos relacionados a manutenção de equipamentos, máquinas e pessoas.

Bruna Thalita Alexandre Silva

Engenheira Civil pela Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). Trabalho de Conclusão de Curso na área de pavimentação, com análise da desenvoltura de pavimento asfáltico reciclado para uma nova mistura. Possui experiencia na construção civil e na elaboração de projetos. Atualmente está cursando pós-graduação em Engenharia de Segurança do Trabalho na FIP, e mestrado em Engenharia Mecânica na área de Fenômenos de Transporte e Energia na UFCG.

Gabriel de Castro Coêlho

Possui graduação em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal da Paraíba (2015), mestrado em Engenharia Mecânica (2018) e doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais (2023) pela Universidade Federal de Campina Grande. Realizou estágio de pós-doutorado no PPGEM/UFCG, com pesquisa ativa no Laboratório de Vibrações e Instrumentação (LVI). É professor da Universidade Federal de Campina Grande, alocado na Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica (UAEM/UFCG) e líder do grupo de pesquisa "Núcleo Avançado em Fratura, Fadiga e Integridade Estrutural" (NAFFIE). Tem experiência em Engenharia Mecânica, de Materiais e Metalúrgica focada em Mecânica da Fratura, Fitness-For-Service,

Avaliação Crítica de Engenharia, Análise de Tensões e Deformações, Modelagem e Simulação por Elementos Finitos, Mecânica da Fratura Computacional, Comportamento Mecânico dos Materiais, Caracterização Microestrutural de Materiais Metálicos, Manufatura Aditiva por Deposição a Arco, Metalurgia da Soldagem.

Marco Antonio dos Santos

Possui graduação em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (1974), mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (1976) e doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (1990). Atualmente é Professor Titular da Universidade Federal de Campina Grande. Tem experiência na área de Engenharia de Materiais e Metalúrgica, com ênfase em Propriedades Mecânicas dos Metais e Ligas, atuando principalmente nos seguintes temas: propriedades mecânicas, aços ARBL para tubulações, mecânica da fratura, juntas soldadas e tenacidade à fratura.

Sebastião da Silva Pinto

Licenciado em Física pela Universidade Estadual da Paraíba (UEPB) e mestre em Engenharia Física pela UFRPE-UACSA, atuou como Professor voluntário do Programa Mais Educação e Professor de Matemática e Física, na Escola Estadual de Ensino Fundamental e Médio Padre Hildon Bandeira, onde também ocupou o cargo de Presidente do Conselho Escolar. Foi Secretário, Presidente e Vice-Presidente do OSA Campina Student Chapter, ligado a Optical Society of America (OSA). Atualmente é Doutorando em Ciências e Engenharia de Materiais na UFCG.

Laura Hecker de Carvalho

Bacharel em química pela University of Waterloo (1979), Mestre em Química pela University of Waterloo (1981) e Doutora em Química pela University of Waterloo (1985), com Pós- Doutorado no ENSAM-Paris em 1992-1993, ingressou na UFPB Campus II, atual UFCG em 1986. Atualmente é professor Titular da Universidade Federal de Campina Grande. Tem experiência na área de Engenharia de Materiais e Metalúrgica, com ênfase em Materiais Conjugados Não- Metálicos. Suas principais linhas de pesquisa desenvolvidas tratam de materiais compósitos poliméricos reforçados por fibras vegetais e por cargas minerais, de importância regional. Na última década vem também investigando nanocompósitos poliméricos utilizando bentonitas da Paraíba. A reciclagem e o desenvolvimento de sistemas poliméricos mais sustentáveis, menos poluentes e mais eco-compatíveis fazem parte do seu interesses. Atualmente investiga o comportamento de biocompósitos bionanocompósitos poliméricos. As propriedades mecânicas, térmicas, e reológicas de sistemas termofixos e termoplásticos bem como a capacidade e cinética de sorção de água desses sistemas têm sido investigadas em função da aditivação, condições de processamento, exposição térmica, higrotérmica e biodegradação.

Felipe Silva Lima

Possui graduação em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal de Campina Grande (2017) tendo sido bolsista do Programa de Educação Tutorial (PET), programa sob encargo da Secretaria de Educação Superior (SESu/MEC), nos anos de 2013 a 2016. Em 2019 obteve o título de Mestre em Engenharia Mecânica, com ênfase em Análise e Projeto de Sistemas Termomecânicos, pela Universidade Federal de Campina Grande (PPGEM/UFCG). Durante o mestrado, participou do comitê organizador do Simpósio de Pós-graduação em Engenharia Mecânica - SIPGEM (2017-2019). Foi professor substituto do Departamento de Engenharia Biomédica da UFRN - Universidade Federal do Rio Grande do Norte (2021). Atualmente é discente em nível de doutorado associado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal da Paraíba (PPGEM/UFPB). Os interesses de pesquisa estão associados à Mecânica dos Sólidos e, dentre os temas abordados, destacam-se: materiais e estruturas inteligentes com ênfase em Ligas com Memória de Forma (LMF).

Railson de Medeiros Nóbrega Alves

Atualmente doutorando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PPGEM) da UFPB, com pesquisa voltada para o processo de fabricação de Ligas com Memória de Forma. Concluiu o mestrado em

Engenharia Mecânica pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Campina Grande (PPGEM-UFCG), Campus Campina Grande em 2019. Formado em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) realizando intercâmbio sanduíche para a Université Technologie de Compiègne (UTC) localizada na França pelo programa BRAFITEC e sendo patrocinada pela CAPES/CNPq. Participou da criação do I e II Simpósio de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (SIPGEM-UFCG). É membro do Laboratório Multidisciplinar de Materiais e Estruturas Ativas (LaMMEA).

Alan de Oliveira Monteiro

Possui ensino médio – segundo grau - pela Panorama Jovem(2020). Tem experiência na área de Engenharia Mecânica.

Júlio Feitosa da Silva Neto

Graduado em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). Tenho experiência na área de Manufatura Aditiva, com foco em materiais poliméricos e metálicos. Atuei na Fundação Parque Tecnológico da Paraíba (PaqTcPB/PB) no programa da Incubadora Tecnológica de Campina Grande (ITCG) como projetista e desenvolvedor de soluções para indústria de manufatura e odontologia. No Laboratório de Engenharia de Motocicleta (LABEM), participei ativamente no projeto e fabricação do sistema de admissão e injeção eletrônica do protótipo de motovelocidade MOTOSTUDENT 2018. No projeto de extensão Scuderia, no desenvolvimento de um sistema de frenagem para protótipo Fórmula SAE combustão, para eventos 2018 e 2019. Membro fundador do projeto de extensão E- Resistane como gerente de projetos mecânicos para aplicação em protótipo de Fórmula SAE elétrico. Nestes projetos foram realizados: -Modelagem CAD; Simulação por Elementos Finitos; -Fabricação de componentes; -Ensaios mecânicos e ensaios não destrutivos segundo norma ABNT e SAE para validação. Pesquisador de Ciência e Tecnologia no Laboratório de Soldagem (LabSol) participando de projetos de PD para os setores de Manufatura Aditiva e Inteligência Artificial, na modalidade ITC do CNPq com ênfase na aplicação de inteligência artificial na identificação e classificação de defeitos internos em pré-formas de AISI 316 L-Si obtidos por Manufatura Aditiva por Deposição a Arco por Curto Circuito Controlado. Destaques Acadêmicos: Monitor de Desenho Técnico Mecânico; Monitor de Mecânica dos Fluidos; Monitor de Ensaios dos Materiais; Bolsista ITC-CNPq. Conhecimentos Complementares: - Matlab (Básico) - Termografia (Básico) - Python (Intermediário) - Impressão 3D FDM e Resina (Avançado) - Usinagem CNC e Convencional (Avançado) - Desenho Assistido por Computador (Avançado) - Caracterização de Propriedades Mecânicas (Intermediário)

Glauco Ruben de Freitas de Brito

Graduado em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal de Campina Grande (2017). Mestre em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal de Campina Grande(2021). Membro integrante da equipe ParahyAsas-Aerodesign, durante o ano de (2009). Estagiário em Engenharia Mecânica (2017), responsável pela implantação de ferramentas de gestão industrial e Engenharia de Processos, na indústria de materiais poliméricos, bem como, elaboração de planos de manutenção preditiva em compressores industriais e máquinas de sopro de materiais poliméricos. Membro consultor independente na empresa Supremma Engenharia (2018), atuando no setor de manutenção preditiva por análise de vibrações em motores Diesel da indústria calçadista. Possui mestrado em Engenharia Mecânica (PPGEM/CCT-UFCG). Obteve o título de mestre em Engenharia Mecânica, ao defender a dissertação intitulada: Estudo da Cinética da Transformação Martensita-Austenita em Ligas Ni- Ti-Hf com Efeito de Memória de Forma (2021). Atuou profissionalmente na Indústria automotiva no setor de modelagem computacional, utilizando Método dos Elementos Finitos, Softwares CAE (Computer Aided Engineering), visando aplicações em vibrações mecânicas e atenuação e controle do ruído (Acústica automotiva).

Carlos José de Araújo

Possui Graduação e Mestrado em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal da Paraíba (1991; 1994), e Doutorado em Engenharia Mecânica e de Materiais (Comportement Mécanique et Macroscopique des Matériaux) pelo Institut National des Sciences Appliquées de Lyon (França), INSA - Lyon (1999). É Professor Titular da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), além de Pesquisador do CNPq desde 2006, atualmente no Nível 1C. Tem experiência na área de Engenharia Mecânica e de Materiais, com ênfase

em Mecânica dos Sólidos e Propriedades Físicas e Mecânicas dos Metais e Ligas. Desde os anos 1990 vem realizando pesquisas de caráter interdisciplinar principalmente no seguinte tema: Desenvolvimento de Ligas com Memória de Forma - Fabricação, Caracterização, Simulação e Aplicações. Teve atuação também como Avaliador de Cursos de Graduação do MEC/INEP entre 2005 e 2019, e atuou como Secretário Regional Nordeste (2010 - 2018) da Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas (ABCM), sendo ainda membro do seu comitê científico de Materiais e Estruturas Inteligentes desde 2010. Foi presidente do Congresso Nacional de Engenharia Mecânica (CONEM) no ano de 2010, realizado em Campina Grande - PB. Na UFCG foi coordenador do curso de Graduação em Engenharia Mecânica (2004 - 2007) e também coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PPGEM, 2012 - 2016). Entre 05/2017 e 04/2018 foi Pesquisador Visitante no Exterior - Sênior (CAPES), atuando no grupo Biomedical and Mechanical engineering of Materials (BioMMat) do Laboratório TIMC-IMAG (UMR CNRS 5525) da Université Grenoble Alpes (UGA), na França.

Yuri Emanoel Pereira Dias

Tem experiência na área de: Instalações elétricas prediais, controle de almoxarifado, projetos e manutenções de energia solar fotovoltaica. Além de conhecimento das áreas de Inteligência Artificial, aprendizado de Máquina (machine learning) com ênfase em reconhecimento de imagens. Vinculado ao LABSOL (Laboratório de Soldagem da UFCG) para atividades relacionadas à manufatura aditiva, soldagem em geral e processos de projeto e usinagem.

Josedite Saraiva de Souza

Possui Doutorado em Engenharia de Processos pela Universidade Federal de Campina Grande (2014), Mestrado (2009) e Graduação (2006) ambos em Engenharia Química pela Universidade Federal de Campina Grande UFCG, Cursando Licenciatura em Química na Faculdade Cruzeiro do Sul Educacional. Foi integrante do projeto de pesquisa Edital MCT/CNPq/CT-Hidro No 22/2009 no Desenvolvimento de produtos e processos poupadores de água com ênfase em Operações de Separação e Mistura. Atuou como Professora e Coordenadora Adjunta no Núcleo de Pesquisa de Engenharias Gerais - NPEG FMN-CG nas áreas de Mecânica dos Fluidos, Hidráulica e Transferência de Calor (Térmica e Fluidos) com ênfase às aplicações industriais com vistas ao desenvolvimento e otimização de produtos e processos, com economia de energia e redução de emissão de poluentes, visando a Sustentabilidade e Alternativas Energéticas. Também fez parte da Assessoria de Inovação e da Assessoria Técnica Científica da CEAD/UFCG (Coordenação de Educação a Distância), e na comissão do Programa de Pós- Graduação da Unidade Acadêmica de Engenharia Biotecnologia e Bioprocesso CDSA/UFCG.

Severino Rodrigues de Farias Neto

Graduado em Engenharia Química pela Universidade Federal da Paraíba (1988), mestrado em Engenharia Química pela Universidade Federal da Paraíba (1992) e doutorado em Engenharia de Processos pela Universidade de Nantes (1997). Atualmente é Professor de Magistério Superior da Classe E - Titular da Universidade Federal de Campina Grande. Tem experiência na área de Engenharia Química, com ênfase em Operações de Separação e Mistura, atuando principalmente nos seguintes temas: fluidodinâmica computacional, escoamentos multifásicos (separação água/óleo - gás/sólido; transporte de gás/óleo e água/óleo; escoamento em meios porosos - membranas cerâmicas e reservatórios petrolíferos; entre outros).

Fabiana Pimentel Macêdo Farias

Possui graduação em Engenharia Química pela Universidade Federal da Paraíba, mestrado em Engenharia Química pela Universidade Federal da Paraíba e Doutorado em Engenharia de Processos pela Universidade Federal de Campina Grande (2006). Atuou como professora visitante da Universidade Estadual da Paraíba (2006-2007). Tem experiência na área de Engenharia Química, atuando principalmente nos seguintes temas: fluidodinâmica, secagem em ciclone e separação água/óleo em hidrociclones. Também possui conhecimento no código computacional CFX. Atualmente é Professora da Universidade Federal de Campina Grande, Campus de Sumé, na Unidade Acadêmica de Tecnologia do Desenvolvimento (UATEC) do Centro de Desenvolvimento Sustentável do Semi-Árido (CDSA).

Roniere Leite Soares

Professor da Universidade Federal de Campina Grande-PB desde 2012, lotado na Unidade Acadêmica de Engenharia de Produção. Possui graduações em Desenho Industrial, pela Universidade Federal da Paraíba (1991-1995) e Licenciatura Plena em Letras, pela Universidade Estadual da Paraíba (1997-2003). Além disso é graduado em Música pela Claretiano (2021). É pós-graduado, em nível Stricto Sensu, no Mestrado Interdisciplinar em Ciências da Sociedade, UEPB (2003-2005) e no Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais, pela Universidade Federal de Campina Grande-PB (2011-1013), onde desenvolveu um redesenho da microválvula de Bellouard. Possui Doutorado no Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais (UFCG, 2015-2019), onde desenvolveu materiais inteligentes Ni-Ti-Hf.

Vitória Hellem Marques Costa Guedes

Cursou ensino médio no colégio público Presidente Geisel, localizado no Juazeiro do Norte. Graduada em Engenharia de Materiais pela Universidade Federal do Cariri (UFCA) . Ocupou o cargo de coordenadora de finanças do centro acadêmico de Engenharia de Materiais da UFCA. Foi bolsista por dois anos de Iniciação Científica em Desenvolvimento Tecnológico (PIBIT), trabalhando com Compósito de Celulose e Molibdato de Cério, com foco nas suas propriedades fotoeletroquímicas, visando sua aplicação na construção de sensores fotoeletroquímicos. Estagiou na Universidade Federal do Cariri no laboratório de Química, produzindo síntese e caracterização de matrizes poliméricas de celulose e de materiais cerâmicos para a produção de compósitos com celulose. Foi monitora voluntária na disciplina de Química Geral para Engenharia Civil e Engenharia de Materiais. Fez parte da organização da quarta e quinta Semana de Engenharia de Materiais (SEM) da UFCA. Atualmente cursa mestrado na Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) pelo Programa de Pós Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais (PPGCEMat), o campo de pesquisa concentra-se nas Ligas de Titânio e Nióbio, com ênfase especial na investigação de suas propriedades relacionadas ao fenômeno de Memória de Forma.

Suelene Silva Araújo

Possui graduação em Engenharia de Materiais pela Universidade Federal de Campina Grande(UFCG) (2012).Mestrado em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal de Campina Grande(UFCG)(2015) e Especialização em Engenharia e Segurança do Trabalho pela Faculdade Integrada de Patos(FIP) (2018). Possui ampla experiência no desenvolvimento de projetos para a área de polímeros (Nanocompósitos) e metais (ligas com memória de forma) com intensa atuação prática em laboratórios de caracterização física e mecânica de materiais. Apresenta boa vivência de sala de aula como docente de ensino superior ministrando disciplinas do ciclo básico e profissional em cursos de Bacharelado em Eng. de Produção, Eng. Mecânica, Ciências Contábeis e Administração de Empresas. Na área de segurança do trabalho, auxiliou a execução de trabalhos de consultoria, além de atuar como tutora externa do curso de Tecnólogo de Segurança do Trabalho e também como docente de cursos de Pós-Graduação na área de Gerenciamento de Obras e Eng. e Segurança do Trabalho. Como coordenadora de Engenharias (Produção e Civil) e também como responsável pela modalidade EAD (coordenadora de polo) foi possível realizar um trabalho de liderança buscando a melhoria dos resultados/indicadores acadêmicos além de atuar fortemente na retenção/fidelização dos discentes.

Emily Bezerra Coutinho Cruz

Graduada em Nutrição (Bacharelado) pela Faculdade Mauricio de Nassau (2015). Graduada em Engenharia de Alimentos pela Universidade Federal da Paraíba (2020). Mestre em Engenharia de Alimentos pela Universidade Federal de Campina Grande (2022). Atuou com gestão de qualidade em indústria de beneficiamento vegetal no ano de 2016 a 2018. Experiência na área de ciência e tecnologia de alimentos com ênfase em Tecnologia de Leite e derivados, Análise Sensorial e Processamento de matérias primas de origem vegetal.

Juliana Tatiaia de Morais Dias

Graduada em Engenharia de Alimentos pela Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). Desenvolve atividades laboratoriais e possui experiencia na área de tecnologia, processamento e análise de alimentos,

além de atuar nas áreas de Química de Biomassa e de Meio Ambiente, com ênfase em tratamento de água e efluentes.

Maria Tereza Sarmento da Fonsêca

Graduada em Engenharia de Alimentos pela Universidade Federal de Campina Grande (2019) e mestranda em Engenharia Agrícola, com ênfase em processamento e armazenamento de produtos agrícolas, também pela mesma instituição. Sua pesquisa, intitulada Ação da Força Ácida na Extração de Compostos Fenólicos da Casca de Jabuticaba via Hidrólise Química, foca na valorização de compostos bioativos. Possui experiência nas áreas de controle de qualidade, processos fermentativos, secagem e microbiologia. Atua principalmente na aplicação de técnicas de extração de compostos naturais e aproveitamento de resíduos agrícolas.

Sabrina dos Santos Costa

Graduado em Química pela Universidade Estadual da Paraíba (2006), Especialista em Metodologia do Ensino de Química pelas Faculdades Integradas de Jacarepaguá (2009) e Mestre em Sistemas Agroindustriais Pela Universidade Federal de Campina Grande (2019). Atualmente é técnico em laboratório (área - química) da Universidade Federal de Campina Grande. Tem experiência na área de Química.

Manoel Pessoa Ferreira Neto

Engenheiro Alimentício formado pela Universidade Federal de Campina Grande e Aluno de pós-graduação em Engenharia de Alimentos pela Universidade Federal de Campina Grande. Mateus Pereira de Macêdo Possui graduação em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal de Campina Grande (2024) e ensino médio - segundo-grau - pela Escola Estadual de Ensino Fundamental e Médio Doutor Trajano Nóbrega (2016). Isabelly Marcela Araújo Pequeno Possui ensino médio – segundo grau - pela EEE MÉDIO INOVADOR E PROFISSIONALIZANTE DR HORTÊNCIO (2018).

Charlene Maria de Alcântara

Graduanda em Engenharia de Alimentos pela Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Centro de Ciência e Tecnologia Agroalimentar (CCTA), Campus Pombal. Participante do grupo de pesquisa do laboratório de Química, Bioquímica e Análises de Alimentos do CCTA. Bolsista de Iniciação Científica (PIVIC/CNPq-UFCG, 2019-21). Mestre em Tecnologia Agroalimentar (PPGTA), Universidade Federal da Paraíba (UFPB), Campus Bananeiras (2022- 2023). Ex Bolsista do Projeto "Diagnóstico da Agroindústria do Semiárido Brasileiro: Construção e Análise de Banco de Dados para apoio á Decisão no Setor Agroindustrial da Paraíba, Rio Grande do Norte e Pernambuco" (INSA), e do projeto Semiárido Sustentável e Inovador (INSA). Atualmente doutoranda em Engenharia de Processos (PPGEP), Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Campus sede (2023-2026). Atuante na área de qualidade pós-colheita, processamento mínimo e tecnologia da conservação de alimentos.

Francislaine Suelia dos Santos

Engenheira Agrícola pela a Universidade Federal de Campina Grande (2015), Mestre (2018) e Doutora (2022) em Engenharia Agrícola com concentração em Armazenamento e Processamento Agrícola (UFCG), Técnica em Segurança do Trabalho, formada pela Escola Técnica Redentorista e Especialista em Engenharia de Segurança do Trabalho (2022). Professora Adjunta da Universidade Federal de Campina Grande lotada no curso de Engenharia Agrícola na área de Processamento e Armazenamento Agrícola, nas disciplinas: Estatística e experimentação agrícola, Fisiologia pós-colheita e Produção e tecnologia de sementes. Professora convidada da pós-graduação em Engenharia Agrícola (PPGEA/UFCG) na disciplina Fisiologia Pós-Colheita de frutas e hortaliças. Atuo nas áreas de processamento e armazenamento de produtos agrícolas, desenvolvimento de novos produtos alimentícios, propriedades químicas, físicas, reológicas e termodinâmicas, análise e tecnologia de sementes, prospecção tecnológica e redação de patentes.

Tatiany Gonçalves Lisboa

Graduanda em Tecnologia da Produção Sucroalcooleira pela Universidade Federal da Paraíba (UFPB). Voluntária nos projetos de extensão intitulado "Disseminando o Conhecimento do futuro Energético do Brasil: O Hidrogênio Verde, em parceria com as Escolas da Zona Rural do Município de Santa Rita" e atualmente aluna de Iniciação Científica na pesquisa "Produção de amilase por Aspergillus sp FSDE16 e sua aplicação na sacarificação de resíduos ricos em amido&quot

Mikael Angelo Martins Souza

Aluno de graduação em Tecnologia de Produção Sucroalcooleira. Extensionista bolsista em Cultivo Limpo: ações educativas e informativas aos agricultores sobre os impactos dos agrotóxicos e seus resíduos na saúde e no meio ambiente e estagiário em Produção de Amilase pela Degradação do Amido pelo Fungo Aspergillus.

Josivanda Palmeira Gomes

Possui graduação em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal da Paraíba (1989), Mestrado em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal da Paraíba (1992) e Doutorado em Engenharia de Alimentos pela Universidade Estadual de Campinas (1999). Atualmente é Professora Titular da Universidade Federal de Campina Grande na Graduação de Engenharia Agrícola e Pós-Graduação de Engenharia Agrícola e Engenharia de Processos; Participa do Comitê Institucional do PIBIC/PIBITI/PIVIC/PEM da UFCG. É Coordenadora da Área de Engenharia de Processamento Agrícola no Curso de Engenharia Agrícola. Participou do Comitê de Ética da UFCG (2016-2019), Editora Associada da Revista Brasileira de Engenharia Agrícola (2004-2022) do Comitê Assessor das Ciências Agrárias no CNPq (2016-2022) e Coordenadora do Programa de Pós-Graduação da Unidade Acadêmica de Engenharia Agrícola do CTRN/UFCG (2006-2010 e 2020-2023). Tem experiência na área de Engenharia Agrícola, com ênfase em Processamento e Armazenamento de Produtos Agrícolas, atuando principalmente nos seguintes temas: sementes, extratos vegetais, secagem e armazenamento de produtos agrícolas (grãos, sementes, frutas), estudo de fermentação em produtos biológicos, enriquecimento nutricional, entre outros. TESE (DOI): 10.29327/43399099. Informo ainda que tivemos uma PATENTE CONCEDIDA em 2024. Número do Depósito: BR 102018077531-6. Título: Processo de enriquecimento proteico do sorgo Sorghum bicolor L. Moench associado à palma forrageira Opuntia ficus indica Mill por fermentação semissólida. Classificação Internacional: A23K 10/12.

Laís Campos Teixeira de Carvalho Gonçalves

Doutora em Biotecnologia pela Universidade Federal da Paraíba (2017). Mestre em Biologia Celular e Molecular pela Universidade Federal da Paraíba (2012). Possui graduação em Ciências Biológicas (Bacharelado e Licenciatura) pela Universidade Federal da Paraíba (2010). Atualmente é Professora Adjunta do Departamento de Tecnologia Sucroalcooleira (DTS/UFPB). Coordenadora do Laboratório de Biotecnologia e Bioprocessos (LABIP). Desenvolve pesquisas na área de biotecnologia de microrganismos, a partir da produção de bioprodutos com aplicações na agroindústria. Na extensão, promove ações educativas e informativas aos agricultores sobre os impactos dos agrotóxicos e seus resíduos na saúde e no meio ambiente. Tem experiência em: biologia molecular, produção de enzimas e fermentação.

Lucas Manuel Gomes dos Santos

Possui graduação em Agroecologia pela Universidade Federal de Campina Grande (2016) e ensino médio – segundo grau - pela Academia de Comércio Epitácio Pessoa (2014) Débora Rafaelly Soares Graduada em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal de Campina Grande (2007), Especialista em Docência para a Educação Profissional e Tecnológica pelo Instituto Federal do Espírito Santo (2021), Mestre em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal de Campina Grande (2010) e Doutora em Engenharia de Processos pela Universidade Federal de Campina Grande (2015). Tem experiência nas áreas de pesquisa e docência, atuando principalmente nos seguintes temas: processamento de produtos agrícolas, tecnologia

@editorapoisson

www.poisson.com.br
contato@poisson.com.br

https://www.facebook.com/editorapoisson